

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM LATOSSOLO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcelo Kunz

Santa Maria, RS, Brasil

2009

COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM LATOSSOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

por

Marcelo Kunz

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Máquinas Agrícolas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinado,
aprova a Dissertação de Mestrado

**COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM LATOSSOLO SOB
INTEGRAÇÃO LAVOURA - PECUÁRIA**

elaborado por

Marcelo Kunz

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, Dr.

(Presidente/Orientador)

Thomé Lovato, Dr. (UFSM)

Milton da Veiga, Dr. (Epagri / SC)

Santa Maria, 20 de março de 2009.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Miguel Reichert, pela orientação neste trabalho e pelos conselhos profissionais prestados para o meu crescimento científico. Também agradeço pela dedicação e apoio demonstrado ao longo destes anos.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade oferecida de realizar o curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola oportunidade de realização do curso de mestrado.

A todos os funcionários e professores que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. A instituição CAPES, pelo financiamento da minha bolsa durante os dois anos de estudo.

Ao professor Dalvan Reinert e Jackson Albuquerque pelos vários esclarecimentos de dúvidas, e pela amizade.

Aos colegas da física do solo: Mauricio, Braguinha, Espeto, Mentges, David, Vanderléia, Eduardo, Miriam, Charlotte, Eracilda, Juliana, Suzana, Tiago, Dinha, Davi, Mayra, Neiva, André, Streck, Brandt, Adão e Vinícius pela amizade, apoio e o momentos de descontração e trabalho de campo e laboratório ao longo deste período em que trabalhamos juntos. E em especial aos colegas Paulo e Kaiser pela amizade e auxílios na dissertação.

Agradeço a meus pais Valério e Marlise Kunz, pelo total apoio familiar por está minha mais recente conquista, que certamente será lembrada com muito orgulho. Ao meu irmão Maurício, que me foi meu braço direito nas coletas de campo e serviços de laboratório.

Agradeço aos meus familiares, em especial a minha avó materna Arnilda e a minha sogra pela torcida à conquista deste título, e principalmente a Deus que permitiu que isso tudo acontecesse.

Aos meus amigos (as) da localidade de Arroio Grande Ibirubá e da empresa Löser cereais pelo incentivo ao estudo.

Aos amigos de graduação, aos compadres e amigos meu muito obrigado.

Ao grupo PEOOOO, pela forte amizade o meu muito obrigado.

Agradeço em especial à minha namorada Simone Noremborg, pelo amor, carinho e compreensão que recebi ao longo de todo o desenvolvimento desta dissertação. Beijos. "Eu amo a minha namorada".

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM LATOSSOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA - PECUÁRIA

Autor: Marcelo Kunz

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de março de 2009.

A compactação do solo sob tráfego de animais vem se tornando um problema crescente em solos utilizados sob integração lavoura-pecuária. O objetivo deste estudo foi de determinar o efeito da integração lavoura-pecuária e diferentes manejos de manejo do solo nos seus atributos hídricos e mecânicos e relacioná-los com o desenvolvimento e a produtividade da soja. Os objetivos específicos foram: verificar o efeito da ausência do pisoteio animal sobre os atributos hídricos e mecânicos do solo e crescimento da soja; avaliar a suscetibilidade do solo à compactação, através dos parâmetros de compressibilidade do solo; verificar a relação da permeabilidade ao ar com a tensão da água e o espaço poroso do solo; avaliar a relação entre o crescimento das plantas e conteúdo de água; avaliar o efeito residual da escarificação. O experimento foi instalado no ano de 2007, numa área agrícola comercial, no município de Ibirubá (RS). O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico. Avaliaram-se a densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) a resistência do solo à penetração (RP) e a umidade (θ) do solo, bem como emergência e altura de planta, crescimento radicular e produtividade da soja. O delineamento experimental foi blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: semeadura direta sem pastejo (SD/SP), semeadura direta com pastejo (SD/CP) e escarificado (Esc). A Ds, Mi, Ma, Pt, CRA e a K_a foram determinadas em amostras de solo coletada com estrutura preservada nas camadas de 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m, em três épocas: antes do pastejo (agosto de 2007), pós-pastejo (dezembro de 2007) e pós-pastejo (outubro de 2008). A curva de compressão do solo foi determinada em amostra equilibrada na tensão de 0,03 MPa nas duas primeiras camadas acima citadas. Os resultados indicaram que a escarificação em solos sob integração lavoura-pecuária sob plantio direto proporciona condições físico-hídrica do solo menos favoráveis ao desenvolvimento das plantas, afetando negativamente o rendimento de grãos da cultura da soja. O solo escarificado sofreu alterações impostas pelo pisoteio dos animais, reduzindo o efeito residual do mesmo. A ausência dos animais não promoveu alterações expressivas na Ds, Mi, Ma e Pt no solo manejado sob plantio direto. A escarificação diminuiu a retenção de água comparado com solo não escarificado. A RP apresentou relação direta com a umidade, abaixo de 20 % obteve-se valores acima de 2 MPa de RP. Na SD/CP o sistema radicular apresentou desvio de crescimento em profundidade, principalmente na camada 0-0,07 m, desvio não observado na SD/SP e no Esc. A altura de planta no SD/SP foi maior do que nos demais tratamentos e a menor produtividade de grãos foram obtidos no Esc. em ano com déficit hídrico. A maior K_a foi observada nos menores potenciais matriciais e na camada superficial do solo, onde há maior presença de macroporos, com redução em profundidade. Obteve-se uma relação direta entre a K_a e o ϵ_a do solo. A pressão aplicada pelo tráfego dos animais elevou os valores de σ_p na camada superficial. Com a escarificação do solo a camada superficial, houve menor capacidade de suporte, ou seja, maior suscetibilidade à compactação.

Palavras-chaves: integração lavoura - pecuária, pisoteio animal, permeabilidade ao ar, pressão de pré-consolidação, curva de retenção de água.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

PHYSICAL BEHAVIOR OF A OXISOL UNDER CROP-LIVESTOCK INTREGATION

Author: MARCELO KUNZ
ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, March 20, 2009.

Soil compaction under traffic of animals has become an increasingly significant problem in soils used for crop-livestock integration. The objective of this study was to determine the effect of integration crop-livestock and different soil management systems on their attributes water and mechanical and relate them to the development and productivity of soybean. The specific objectives were: to investigate the effect of the absence of animal trampling on the water and mechanical attributes of soil and growth of soybean; to evaluate susceptibility to soil compaction by the parameters of the compressibility of the soil; determine the relationship of permeability to air with the tension of the water and soil pore space; evaluate the relationship between plant growth and water content; evaluate the residual effect of chiseling. The experiment was installed in 2007, in a commercial agricultural area in the municipality of Ibirubá (RS). The soil of the place is classified as Oxisol. Bulk density (D_s), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) total porosity (P_t) resistance to penetration (RP) and soil moisture (θ), emergence and plant height, root growth and yield of soybean were evaluated. The experimental design was randomized blocks with three replications. The treatments were: tillage without grazing (SDS / P), tillage with grazing (SDC / P) and chiseling (Esc). The D_s , Mi , Ma , En , CRA and K_a were determined in soil samples collected with the structure preserved in layers: 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m in three periods: before grazing (August 2007), post-grazing (December 2007) and post-grazing (October 2008). The soil compression curve in balanced sample was determined in tension of 0.03 MPa in the first two layers above. The results indicated that the chiseling sporadic in soils under crop-livestock integration without tillage provides soil hydro-physical conditions less favorable for the development of plants. The preparation with chisel negatively affected grain yield of soybean. The soil whit chiseling had its proprieties changed by the treading of animals, reducing the residual effect of it. The absence of animals did not promote significant changes in D_s , Mi , Ma and P_t managed under the soil tillage. The chiseling decreased soil moisture compared to other treatments. The PR showed a direct relationship with soil moisture, for below 20% obtained values above 2 MPa for RP were. In SD/CP , the root system showed deviation of growth in depth, especially in the 0-0,07 m layer. The deviation unobserved in SD/SP and Esc . The same behavior was not observed in SD/SP and Esc . in years with water deficit. The plant height in SD/SP was higher than in other treatments and the lowest grain yield was obtained in Esc . Highest K_a was observed in lower potential matric and the surface layer of soil, where there is greater presence of macroporosity, with reduction in depth. A direct relationship between the soil K_a and ϵ_a was observed. The pressure applied by the traffic of animals increased the values of σ_p in the surface layer. With chiseling of the soil, the surface layer had less ability to support loads and greater susceptibility to compaction.

Keywords: integrated crop-livestock, animal trampling, permeability to air, pre-consolidation stress, soil water retention curve.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostradas..... | 21 |
| Tabela 2 – Cronograma de atividades de campo durante a execução do experimento..... | 23 |
| Tabela 3 – Atributos físicos do solo antes do pastejo dos animais e após os dois ciclos de pastejo, em área com integração lavoura pecuária com três diferentes sistemas manejos do solo..... | 27 |
| Tabela 4 – População de plantas nos diferentes sistemas de manejo do solo..... | 32 |
| Tabela 5 – Produtividade da cultura da soja nos diferentes sistemas de manejo..... | 35 |
| Tabela 6 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostradas..... | 46 |
| Tabela 7 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) nos diferentes sistemas manejos do solo e nas camadas amostradas..... | 57 |
| Tabela 8 – Valores médios de índice compressão (IC) nos diferentes sistemas manejos do solo e nas camadas do solo em estudo..... | 58 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Variação da resistência à penetração, antes do pastejo (agosto de 2007) dos animais e aplicação dos tratamentos. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... 28
- Figura 2 – Umidade volumétrica, antes do pastejo (agosto de 2007) dos animais e aplicação dos tratamentos. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... 28
- Figura 3 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... 29
- Figura 4 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... 29
- Figura 5 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade,

| | |
|---|----|
| pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 29 |
| Figura 6 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 30 |
| Figura 7 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 30 |
| Figura 8 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 30 |
| Figura 9 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 31 |
| Figura 10 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 31 |
| Figura 11 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 31 |
| Figura 12 – Distribuição radicular da soja em diferentes sistemas de manejo, observada no perfil cultural (50 x 30 cm). (a) SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); (b) SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e (c) Esc. (preparo escarificado). | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 – Variação da altura de plantas de soja ao longo do ciclo da cultura. SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 34 |
| Figura 14 – Dados de precipitação pluvial, observados durante o ciclo de cultura da soja na safra 2007/08..... | 36 |
| Figura 15 – Diagrama para determinação da σ_p , e IC..... | 45 |
| Figura 16 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (y_m), em três camadas do solo após o pastejo (dezembro de 2007). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 52 |
| Figura 17 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (y_m), em três camadas do solo após o pastejo (outubro de 2008). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado)..... | 53 |
| Figura 18 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o espaço aéreo (ϵ_a) para os sistemas estudados (SD/SP, Esc. e SD/CP), nas duas épocas, nas três camadas. SD/SP (semeadura direta sem pisoteio); Esc. (escarificado); SD/CP (semeadura direta com pisoteio). Pós-pastejo (dezembro de 2007) e pós-pastejo (outubro de 2008). | 54 |
| Figura 19 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten na semeadura direta com pisoteio (SD/CP), escarificado (Esc) e semeadura direta sem pisoteio (SD/SP), coleta realizada pós-pastejo (dezembro de 2007). | 55 |
| Figura 20 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten na semeadura direta com pisoteio (SD/CP), escarificado (Esc) e semeadura direta sem pisoteio (SD/SP), coleta realizada pós-pastejo (outubro de 2008). | 56 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 12 |
| 1.1 Hipótese | 16 |
| 1.2 Objetivo Geral | 16 |
| 1.2.1 Objetivos específicos | 16 |
| 2 CAPÍTULO I COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO AO PISOTEIO -SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJOS. | 18 |
| RESUMO | 18 |
| 2.1 Introdução | 19 |
| 2.2 Material e Métodos | 21 |
| 2.3 Resultados | 26 |
| 2.4 Discussão | 36 |
| 2.5 Conclusão | 40 |
| 3 CAPÍTULO II POROSIDADE DE AERAÇÃO E COMPRESSIBILIDADE DE UM LATOSSOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA | 41 |
| RESUMO | 41 |
| 3.1 Introdução | 42 |
| 3.2 Material e Métodos | 45 |
| 3.2.1 Curva de retenção de água (CRA) | 47 |
| 3.2.2 Permeabilidade ao ar (K_a) e espaço aéreo (ϵ_a)..... | 48 |
| 3.2.3 Teste de compressão uniaxial | 49 |
| 3.3 Resultados | 50 |
| 3.4 Discussão | 58 |
| 3.5 Conclusão | 61 |
| 4 REFERÊNCIAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento mundial da população está estimado em torno de 80 milhões de pessoas por ano, o que aumenta a demanda por alimento em curto prazo. Em vista disso, as propriedades rurais precisam de uma reorganização para maximizar a produção de alimentos, respeitando o ambiente, manejando de forma racional o solo e evitando a sua degradação pelo uso intensivo de tráfego de máquinas e pelo pisoteio animal. A integração entre a produção de grãos e a produção animal (leite ou carne) é uma prática crescente em várias regiões do estado, principalmente em propriedades familiares. Nesse sistema, busca-se a diversificação da propriedade e a geração de renda o ano todo.

Os principais produtos do agronegócio na região sul do Brasil são a soja e o leite produzidos em pequenas propriedades. No Brasil, a soja representou, em 2004, aproximadamente 24,5% do total exportado pelo setor agrícola e 12% do total das exportações do país. Ainda em 2004, foram colhidos 49,79 milhões de toneladas, correspondentes a 26% da produção mundial de soja e a 41,3% da produção brasileira de grãos (CONAB, 2006). Essa cultura participa da economia na maioria dos estabelecimentos rurais, estando presente em 33,14% destes, onde os pequenos agricultores predominam com 93,94% das propriedades com menos de 50 ha, de acordo com o Censo Agropecuário do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2001).

Para não depender unicamente da soja, produtores familiares do Rio Grande do Sul e do Brasil encontraram na venda do leite a garantia de sua sobrevivência no meio rural. Segundo dados do IBGE (1996), 64,4% dos produtores do Brasil vendem menos de 50 litros de leite por dia, o que corresponde a cerca de 60% de pequenos produtores familiares que vendem leite. No Rio Grande do Sul, 48% dos produtores de leite têm unidades de produção com menos de 20 hectares. Analisando esses dados, conclui-se pela necessidade de se aprofundar o estudo nas propriedades que se dedica a essa atividade.

As principais culturas usadas na lavoura de verão são a soja, milho e feijão, totalizando uma área de seis milhões de hectares no Rio Grande do Sul, enquanto que as culturas de inverno, para produção de grãos, ocupam uma área total de um

milhão de hectares (IBGE, 2001). Esses dados indicam que o produtor necessita de uma alternativa econômica para o período de inverno.

Os produtores utilizam, no inverno, o cultivo de aveia-preta (*Avena strigosa schreb.*) e o azevém (*Lolium multiflorum lam.*), sendo o objetivo destas culturas é a rotação de culturas e a alimentação animal. A aveia-preta, quando comparada ao azevém, possui ciclo mais curto e produção de forragem mais precoce. O azevém, por sua vez, é bastante utilizado pela facilidade de ressemeadura natural, resistência a doenças, bom potencial de produção de sementes e possibilidade de associação a outras espécies (SANTOS et al., 2002). Entre essas espécies, destaca-se o trevo branco (*Trifolium repens*), trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) e cornichão (*Lotus corniculatus*) no inverno, que por serem leguminosas tendo como objetivo suplementa as deficiências nutritivas das gramíneas.

Em áreas de pecuária, o período destinado ao pastejo ocorre geralmente na estação de inverno-primavera, que coincide com a época do ano em que o solo permanece com umidade mais elevada, o que pode favorecer o processo de compactação (BASSANI, 1996). Trein et al. (1991) relataram que o pisoteio intenso de animais, especialmente em dias úmidos e em solos argilosos, causa compactação com redução severa da porosidade de aeração, aumento da densidade e redução da infiltração de água.

Uma forma de evitar o processo de compactação do solo é a utilização de cobertura morta com o aumento da matéria orgânica do solo. Uma das alternativas é a utilização de plantas de cobertura durante o inverno, principalmente a aveia, que possui como objetivo de produzir palhada para a semeadura das culturas de verão sob plantio direto. O plantio direto traz diversos benefícios que irão diminuir os custos de produção e o impacto ambiental, tais como menor erosão, menor perda de nutrientes e maior retenção de água no solo. Estima-se que 80% da área cultivada no verão no RS seja sob sistema plantio direto (CONAB, 2008). E no inverno os produtores adotam a semeadura de aveia e azevém a lançar em quase 100% das áreas.

No plantio direto, a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego sobre a área pode causar compactação da camada superficial. A ocorrência desse fenômeno em níveis críticos afeta o desenvolvimento radicular das culturas, por isso tem motivado alguns agricultores, ainda que temporariamente, a retornar ao preparo convencional do solo, visando

corrigir essa limitação (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; TORMENA; ROLOFF, 1996).

Com a intensificação da agricultura, os sistemas normalmente utilizados levaram à redução da fertilidade e à degradação física do solo nas áreas de cultivo, com diminuição na infiltração de água e na disponibilidade de água e de nutrientes. Isso acontece como resultado do aumento da densidade do solo, em sistemas mal manejados e diminuição da porosidade, bem como aumento da resistência à penetração das raízes. Dessa forma, torna-se necessário o aprimoramento de sistemas que proporcionem uma diversificação da propriedade rural, fornecendo ao produtor alternativas diversificadas de renda, sem comprometer a qualidade da estrutura do solo.

Uma das alternativas para diversificar a propriedade rural é a integração lavoura-pecuária, que tem como objetivos maximizar racionalmente o uso da terra, da infra-estrutura e da mão-de-obra, diversificar e verticalizar a produção, minimizar custos, diluir os riscos e agregar valores aos produtos agropecuários. Isso é obtido por meio dos recursos e benefícios que uma atividade proporciona para a outra, tornando a propriedade menos dependente da cultura de verão, reduzindo os riscos do agronegócio (ZANINE, 2006).

Em sistemas integrados de produção de grãos e de carne ou leite, há preocupação com a compactação superficial provocada pelo pisoteio dos animais (SCAPINI et al., 1997; SILVA et al., 2000b). A magnitude da variação de alguns dos atributos físicos está relacionada com a carga animal aplicada na área e o mau manejo dessas áreas pode prejudicar o estabelecimento e o rendimento da cultura que for implantada na sequência. Com o mau manejo dos animais, a degradação do solo ocorre de forma acelerada, pois resulta na compactação da camada superficial, diminuindo, dessa forma, a infiltração de água e provocando escoamento superficial. O resultado é o aumento da erosão do solo, devido, principalmente, à redução na cobertura do solo, prejudicando a qualidade do solo.

O pisoteio provocado pelos animais pode ter um efeito adverso sobre as propriedades físicas do solo, sendo restritivo à camada superficial (TREIN et al., 1991). Isso provoca limitações no crescimento das plantas, quando o pastejo for realizado com teor de água favorável à compactação, pois o movimento da água, do ar e dos nutrientes são afetados ao longo do perfil do solo (CANALLI; ROLOFF, 1997).

Com elevados teores de água no solo, o arranjo é facilitado porque a água, apesar de não ser considerada lubrificante, facilita o arranjo das partículas durante a compactação. Em outras palavras, quanto maior o teor de água do solo, menor a capacidade de suporte de carga do solo, diminuindo, com isso, a pressão admissível no terreno. Segundo Larson; Gupta (1980), com a aplicação de pressões acima da pressão de preconsolidação do solo, quando este está úmido, promovem-se alterações na sua estrutura, acarretando na elevação da densidade e redução da porosidade.

Em função da resistência à penetração estar diretamente relacionada à umidade do solo, apresentando relação inversa, tem sido bastante difícil estabelecer, em nível de campo, os valores críticos de resistência, visto que ciclos de umedecimento e secagem alteram rapidamente de uma possível condição limitante para não limitante em termos de resistência mecânica.

O tráfego intenso de máquinas e animais sobre o solo provoca impactos na qualidade física deste, sendo esses quantificados em diferentes estudos que relacionam com a forma e com qualidade estrutural do solo, tais como: compactação do solo (TORMENA et al., 1996; GUIMARRÃES et al., 2002), densidade (SPERA et al., 2004; BERTOL et al., 2004), resistência do solo à penetração das raízes (CAMARA et al., 2005), porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (SILVEIRA et al., 2008; MARCHÃO et al., 2007), adsorção e absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (BEUTLER et al., 2004). As modificações nessas propriedades ocasionadas pelo manejo inadequado resultam em decréscimo de produção (ASSMANN et al., 2003; SECCO et al., 2004).

Diversos trabalhos conduzidos em condições controladas mostram valores críticos de densidade do solo a partir dos quais há limitações ao desenvolvimento e produtividade de soja e de outras culturas (RESENDE, 1995; TORRES; SARAIVA, 1999). Os efeitos da compactação do solo sobre o desenvolvimento de plantas variam em função da oscilação pluvial ao longo dos anos. Assim, determinado nível de densidade do solo, crítico em um ano, poderá não ser em outro. Porém, limites máximos de compactação provavelmente afetam o desenvolvimento de plantas em qualquer condição climática (TORRES et al., 1999).

Em virtude da grande importância que a atividade leiteira possui no estado do RS, um aspecto a ser considerado no estudo de compactação do solo é que os

impactos causados por tráfego de máquinas e, principalmente, dos animais podem promover a degradação estrutural do solo. Dessa forma, serão estudadas alternativas de forma de uso do solo para maximizar o uso das propriedades rurais na integração lavoura pecuária.

1.1 Hipótese

As áreas com pisoteio animal apresentam valores maiores de densidade, retenção de água e pressão de pré-consolidação do solo e menores valores de porosidade total e macroporosidade do solo, do que as áreas sem pisoteio animal, condição que pode ser alterado pelo escarificador do solo.

Plantas cultivadas em áreas com maior estado de compactação permanecem por períodos mais longos sob condições limitantes ao seu desenvolvimento.

1.2 Objetivo Geral

Determinar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo relacionado aos seus atributos hídricos e mecânicos do solo e o desenvolvimento e a produtividade da soja.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Verificar o efeito da presença e ausência do pisoteio animal sobre os atributos hídricos e mecânicos do solo e crescimento da soja;

2. Avaliar a suscetibilidade do solo à compactação, por meio de parâmetros de compressibilidade do solo;
3. Verificar a relação da permeabilidade ao ar com a tensão da água e o espaço poroso do solo;
4. Avaliar a relação entre o crescimento das plantas e o conteúdo de água;
5. Avaliar o efeito residual da escarificação.

2 CAPÍTULO I COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO AO PISOTEIO -SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJOS.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo de animais sobre os atributos hídricos e mecânicos do solo, relacionando-os com o desenvolvimento e a produtividade da soja. O experimento foi instalado no ano de 2007, numa área agrícola comercial, no município de Ibirubá (RS). A área pertence ao produtor rural Valério Kunz, e o solo do local classificado como Latossolo Vermelho distrófico. Foi avaliada a influência do pisoteio dos animais sobre a densidade (D_s), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i), porosidade total (P_t), resistência do solo à penetração (R_P), umidade do solo (θ), e as conseqüências para emergência e altura de planta, crescimento radicular e produtividade da soja. O delineamento experimental foi blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: semeadura direta sem pastejo (SD/SP), semeadura direta com pastejo (SD/CP) e escarificado (Esc). A D_s , M_i , M_a e P_t foram determinados em amostras de solo com estrutura preservada. As amostras foram coletadas nas camadas de 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m, em três épocas: antes do pastejo (agosto de 2007), pós-pastejo (dezembro de 2007) e pós-pastejo (outubro de 2008). A ausência dos animais não promoveu alterações expressivas na densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo manejado sob plantio direto. A escarificação diminuiu a umidade do solo comparado com o não escarificado. A resistência à penetração apresentou relação direta com a umidade do solo, abaixo de 20 % obteve-se valores acima de 2 MPa de resistência à penetração. O solo escarificado sofreu alterações impostas pelo pisoteio dos animais, reduzindo o efeito residual do mesmo. Na semeadura direta com pisoteio o sistema radicular apresentou desvio de crescimento em profundidade, principalmente na camada 0-0,07 m, desvio não observado na semeadura direta sem pisoteio e no escarificado. A escarificação esporádica em solos manejados sob integração lavoura-pecuária em plantio direto proporciona condições físico-hídricas do solo menos favoráveis ao desenvolvimento das plantas, pois a altura de planta na semeadura direta sem pisoteio foi maior do que nos demais tratamentos e a menor produtividade de grãos foram obtidos no escarificado em ano com déficit hídrico

2.1 Introdução

A produção de leite no Rio grande do Sul vem crescendo em escala e em produtividade nos últimos anos, principalmente nas bacias leiteiras com integração entre produção de grãos e produção animal. Além disso, a região sul do Brasil é considerada uma das maiores produtoras de grãos, devido às inovações utilizadas nas propriedades rurais. A utilização do sistema de produção com Integração Lavoura – Pecuária (ILP), que se caracteriza pela alternância entre a produção de grãos e pastejo de animais, é um sistema flexível que permite a diversificação da propriedade.

A utilização da ILP sob o sistema plantio direto é viável no RS, pois aumenta a rentabilidade econômica da propriedade agrícola (FONTANELLI et al., 2000). No entanto, deve-se ter cuidado para evitar a compactação do solo, que traz como consequência mudanças nas relações solo-ar-água, principalmente em processos dinâmicos tais como o movimento de água, ar e nutrientes, afetando o crescimento radicular das plantas (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Esses efeitos podem ser avaliados pela distribuição radicular no perfil do solo, uma metodologia qualitativa que possui uma grande utilidade na identificação de camadas com impedimento mecânico ao crescimento radicular (COLLARES et al., 2006) nos diferentes sistemas de manejo aplicados no solo.

A compactação do solo causada pelo intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal tem sido apontada como uma das principais causas da degradação de áreas cultivadas em sistema de ILP (ALBUQUERQUE et al., 2001). A compactação provocada pelo pisoteio dos animais é condicionada pela textura do solo (CORREA; REICHARDT, 1995), sistema de pastejo (LEÃO et al., 2004), altura do manejo da pastagem (CASSOL, 2003), quantidade de resíduo vegetal sobre o solo (BRAIDA et al., 2004; SILVA et al., 2000) e umidade do solo (CORREA; REICHART, 1995; TREIN et al., 1991). Estudos demonstram que a presença de animais em áreas cultivadas leva ao aumento da densidade, diminuição da porosidade total e da macroporosidade do solo. O efeito do pisoteio se concentra na camada até 0,05 m de profundidade (TREIN et al, 1991; CASSOL, 2003; BERTOL et al., 1998; BERTOL et al., 2000). O aumento da

densidade do solo na camada superficial pode ser minimizado com a utilização de semeadoras dotadas de sulcadores, na implantação da cultura em seqüência ao pastejo (MORAES; LUSTOSA, 1997), mas a compactação superficial reduz drasticamente a infiltração de água no solo (LANZANOVA, 2007).

De acordo com Hillel (1998), o processo de compactação aumenta a densidade e reduz a macroporosidade do solo, aumentando, assim, a resistência para o crescimento radicular, principalmente em condições de baixa umidade (COLLARES, 2008), e reduz a sua oxigenação. Em solo compactado, o sistema radicular se concentra próximo à superfície (SILVA, 2000), tornando a planta mais susceptível a déficits hídricos e limitando a sua capacidade de absorver nutrientes em camadas subsuperficiais (ROSOLEM et al., 1994).

No sistema de plantio direto, a ausência ou revolvimento mínimo do solo favorece a manutenção de teores de água mais elevados pela manutenção dos resíduos culturais, e pela modificação da distribuição do diâmetro de poros. O tráfego sistemático de máquinas pode promover compactação excessiva na superfície do solo (TORMENA; ROLLOF 1996), principalmente em solo com elevado teor de argila. Apesar dos benefícios oriundos do sistema plantio direto, há trabalhos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetido a esse sistema (KLEIN; BOLLER 1995). Segundo Silva (2003), concluiu que em lavouras sob plantio direto o tráfego de máquinas provocou compactação do solo principalmente em locais onde efetuam - se as manobras dos mesmos.

O aumento da compactação e conseqüente redução do tamanho dos poros, a ponto de impedir a passagem da raiz principal, são compensados pela expansão de raízes laterais com diâmetros menores, que se proliferam e formam um sistema radicular muito denso e raso que, no campo, dificilmente sobrevive a condições de déficit hídrico (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Estudando o efeito de estados de compactação em Latossolos argilosos manejados sob sistema plantio direto, Secco, (2004) verificou que o estado de compactação com valores de densidade do solo de 1,62 e 1,54 Mg m⁻³ e de resistência à penetração de 2,65 e 3,26 MPa proporcionou decréscimo na produtividade do trigo de 18,35 e 34,05%, respectivamente. Cassol (2003) observou redução de 1.500 kg ha⁻¹ do rendimento de soja cultivada em área pastejada, quando a altura de manejo das pastagens de inverno passou de 0,40 m para cerca de 0,10 m. Essa redução na produtividade foi atribuída em parte à redução de

população de soja, na medida que se intensificou a carga animal durante o inverno. O aumento da frequência de pastoreio sobre as pastagens de inverno provoca o aumento da densidade do solo na camada 0-0,05 m, aumentando a resistência à penetração e causando a diminuição da taxa de infiltração de água no solo, bem como afetando negativamente o rendimento de grãos da soja ou do milho subsequente (LANZANOVA, 2007). Outros trabalhos têm indicado que não há efeitos negativos do pisoteio animal sobre as propriedades físicas de solos manejados sob plantio direto (SPERA et al., 2004). Dessa forma, o efeito do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo não está claro, e mais estudos são necessários para ampliar a base de informações e permitir conclusões mais seguras.

Este estudo objetivou avaliar o efeito do sistema de manejo do solo com pisoteio animal sobre diferentes sistemas de manejo sobre os atributos hídricos e mecânicos do solo e relacioná-los com o desenvolvimento e a produtividade da soja cultivada em sucessão à pastagem de inverno.

2.2 Material e Métodos

O experimento foi instalado no ano de 2007, numa área agrícola comercial de propriedade do senhor Valério Kunz, situada na região fisiográfica do Planalto Médio, no município de Ibirubá (RS) (28°38'34" de latitude sul, 53°02'43" de longitude oeste e aproximadamente 420 m de altitude) na região norte do estado. O clima da região enquadra-se na classificação de Köpen, zonas Cfa e Cfb (clima subtropical úmido com verões quentes ou amenos).

Tabela 1 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostradas.

| Camada m | Areia | Silte | Argila |
|-------------|---------------------------------|-------|--------|
| | ----- kg kg ⁻¹ ----- | | |
| 0,00 – 0,07 | 0,222 | 0,255 | 0,552 |
| 0,07– 0,15 | 0,203 | 0,213 | 0,583 |
| 0,20– 0,30 | 0,189 | 0,191 | 0,620 |

O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), cuja análise granulométrica é apresentada na Tabela 1.

A área onde foi instalado o experimento foi utilizada com integração lavoura-pecuária sob plantio direto desde 1998, com milho ou soja no período primavera/verão e aveia + azevém, no outono/inverno. A semeadura foi realizada a lanço em seguida, fez-se a incorporação das sementes com uma grade niveladora de 28 discos. O pastejo com os animais foi realizado quando as culturas apresentavam em torno de 0,30 a 0,40 m de altura. Esses animais não foram separados por idade e sexo na hora do pastejo.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: semeadura direta sem pastejo (SD/SP), semeadura direta com pastejo (SD/CP), e escarificação (Esc.). As parcelas possuíam as dimensões de 15 metros de comprimento e 7 m de largura (105 m²). No tratamento SD/SP considerado como testemunha, as parcelas permaneceram cercadas durante todo o inverno. Nas parcelas do SD/CP, os animais pastejaram livremente durante todo o período de inverno. A escarificação foi realizada com um escarificador de cinco hastes, até uma profundidade de 0,20 m e, após, efetuou-se o nivelamento superficial do terreno com o uso de uma grade de 28 discos. Essa operação foi realizada antes da semeadura da soja.

A semeadura de soja, cultivar Codetec 212, foi realizada no dia 15 de novembro de 2008, com densidade de 240.000 sementes ha⁻¹. A adubação de base foi definida a partir da análise química do solo da área. Utilizou-se 300 kg ha⁻¹ da fórmula 02-20-30, seguindo-se as indicações oficiais de recomendação de adubação e calagem para o Rio Grande do Sul (CQFS, 2004). Para a semeadura, utilizou-se uma semeadora-adubadora para plantio direto da marca Vence Tudo com 5 linhas espaçadas em 0,45 m, dotada de sulcador tipo facão. O trator utilizado foi da marca Massey Ferguson, modelo 265.

A densidade populacional da soja foi avaliada 60 dias após a semeadura, pela contagem das plantas contidas em um metro linear, procedimento realizado em três posições dentro de cada parcela.

A densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do solo foram determinadas em amostras do solo coletadas com estrutura preservada, em anel volumétrico de 0,06 m de diâmetro e 0,05 m de altura, no centro das camadas de 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m. Estes foram coletadas em

três épocas: antes do pastejo (2007) – representa a 1^o coleta de dados no mês de agosto de 2007, pós-pastejo (2007) – representa a 2^o coleta de dados no mês de dezembro de 2007 e pós-pastejo (2008) – representa a 3^o coleta de dados que foi realizada em outubro de 2008. Na tabela 2 estão descritas as atividades realizadas desde a demarcação do experimento até o encerramento do mesmo.

Tabela 2 – Cronograma de atividades de campo durante a execução do experimento.

| Época | Definição tratamentos | Avaliações | Observações |
|----------------------------|-----------------------|---|--|
| Até 2007 | SD/CP | - | Área utilizada com integração lavoura-pecuária |
| Junho 2007 | SD/SP | Ds, PT, Ma, Mi e Rp (1 ^a avaliação) | Demarcação do experimento e cercamento das áreas |
| Novembro 2007 | ESC | - | Plantio da soja logo após escarificação |
| Dezembro | - | Ds, PT, Ma, Mi e Rp, Ka, Pp, CRA (2 ^a avaliação) | |
| Dezembro 2007 à Abril 2008 | - | Ap, Raiz, rendimento | |
| Abril-outubro 2008 | ESC-C/P | Ds, PT, Ma, Mi (3 ^a avaliação) | SD/CP e SD/SP são mantidos |
| Outubro 2008 | - | - | Final do experimento |

A densidade do solo (Ds) foi calculada pela relação entre a massa de solo seco em estufa a 105°C e volume da amostra (Equação 1), a umidade volumétrica do solo foi calculada conforme equação 2, e a Pt, Mi e Ma foram calculadas conforme as equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$Ds = Ms/Vt \quad [1]$$

onde:

Ds = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

Ms = massa de solo (Mg);

Vt = volume do solo (m^3).

$$Uv = (Va/Vt) 100 \quad [2]$$

onde:

U_v = umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$);

V_a = volume de água (m^3);

V_t = volume total (m^3).

$$P_t = (D_p - D_s)/D_p \quad [3]$$

onde:

P_t = porosidade total ($m^3 m^{-3}$);

D_p = densidade de partículas ($Mg m^{-3}$);

D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$).

$$M_i = (M_{-6kPa} - M_{105^\circ C}) / VC \quad [4]$$

onde:

M_i = microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$);

PA_{-6kPa} = massa da amostra com umidade equilibrada no potencial de -6 kPa;

$PA_{105^\circ C}$ = massa da amostra seca a 105 °C;

VC = volume do cilindro (m^3).

$$M_a = P_t - M_i \quad [5]$$

onde:

M_a = macroporosidade ($m^3 m^{-3}$);

P_t = porosidade total ($m^3 m^{-3}$);

M_i = microporosidade ($m^3 m^{-3}$).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada a cada 0,015 m de profundidade, com um penetrômetro digital manual (marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer) com armazenamento eletrônico dos dados. A haste contém uma ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e base com 12,83 mm de diâmetro. As medidas de resistência à penetração foram realizadas nas seguintes épocas: antes do pisoteio animal (agosto de 2007) e durante o ciclo da soja, aos 30, 72 e 140 dias após a semeadura (DAS) (Tabela 2). As medidas de RP foram feitas na linha (RPL) e nas entrelinhas (RPEL) de semeadura, em três pontos por parcela.

Nos mesmos dias em que se avaliou a resistência à penetração, determinou-se a umidade volumétrica do solo, com reflectômetro de domínio de tempo (Time

Domain Reflectometry-TDR), em duas camadas (0-0,1 m, 0,1-0,2 m). Utilizaram-se hastes de 0,1 m de comprimento inseridas no solo verticalmente da camada superior até a inferior, nas duas camadas. As mesmas foram retiradas do solo após cada leitura. A calibração do TDR foi realizada por Collares (2005), para o mesmo tipo de solo, ajustando-se uma função, conforme sugerido por Topp et al. (1980), com a qual se obteve a umidade volumétrica na amostra (θ). A equação 6 expressa o ajuste:

$$\theta = 13,8523 + 1,4462 * Ka - 0,0389 * Ka^2 + 0,0010719 * Ka^3 \quad [6]$$

onde :

$$ka = (t * c / L)^2 ;$$

θ é a umidade volumétrica do solo em ($m^3 m^{-3}$);

ka é a constante dielétrica aparente do solo;

t é o tempo de propagação da onda eletromagnética na haste metálica (ns);

c é a velocidade de propagação da onda ($30 \times 10^9 \text{ cm s}^{-1}$);

L é o comprimento da haste metálica (cm).

A precipitação pluvial foi monitorada com um pluviômetro instalado próximo à área experimental, durante todo o período da condução do experimento.

O efeito do pisoteio animal e da escarificação sobre a cultura foi avaliado pela altura das plantas, distribuição do sistema radicular e rendimento de grãos. A altura das plantas foi medida mensalmente em três plantas por parcela.

Quando a cultura da soja se encontrava em plena floração, fez-se a avaliação qualitativa da distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos, usando o método do perfil cultural, descrito por Böhm (1979). Foi selecionada uma planta representativa da parcela, próximo da qual (0,05 m) foi aberta uma trincheira de 0,70 m de largura por 0,40 m de profundidade. As raízes foram expostas com uma haste pontiaguda de metal e uma malha quadriculada de 0,05 x 0,05 m, foi posicionada sobre as raízes e estas foram fotografadas para a análise da sua distribuição no perfil.

Na maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade das culturas, efetuando a colheita de uma área representativa ($7,5 \text{ m}^2$) em cada parcela experimental. Os resultados foram ajustados para umidade de 13 % e expressados em kg ha^{-1} .

A análise estatística constou de análise de variância e comparações de médias pelo teste DMS a 5% de probabilidade.

2.3 Resultados

Após os ciclos de pastejo contínuos dos animais durante o período de inverno de 2007 e 2008, não se verificou efeito da pressão de pastejo sobre os valores de D_s (Tabela 3) entre os sistemas de manejo. O solo apresentou camadas adensadas na profundidade de 0-0,07cm e na camada de 0,20-0,30cm de profundidade do solo nas diferentes épocas de coleta. Os maiores valores de D_s foram verificados na primeira coleta, efetuada antes do pastejo dos animais em agosto de 2007; assim essa alta densidade pode ser devida à compactação residual pelo tráfego de máquinas e pisoteio dos animais nos anos anteriores à implantação do experimento.

Os valores encontrados foram superiores a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ até uma profundidade de 0,25 m. Considerando a segunda e a terceira coleta, houve um decréscimo de 12,1% na densidade do solo no Esc., 11,5% na SD/SP 11,5% e 6,2% na SD/CP. Mesmo assim, as maiores densidades permaneceram na camada de 0,07-0,15m.

Quanto à porosidade total do solo, os valores ficaram em torno de $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos e camadas estudadas. Houve apenas um acréscimo da P_t na terceira coleta na camada de 0,00-0,07 m, onde os valores encontrados ficaram em torno de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A microporosidade e a macroporosidade do solo apresentaram diferença significativa entre os sistemas de manejo e camadas. A microporosidade apresentou diferença na primeira e na segunda coleta, onde os valores permaneceram em torno de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Foi verificado um decréscimo de valores de microporosidade da primeira para a terceira coleta, provocado pelo pisoteio dos animais. Os valores de macroporosidade se situam em torno de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e percebeu-se um aumento nos valores acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na segunda camada do tratamento com escarificação. Entretanto, esses valores reduziram para $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na terceira coleta nas duas camadas superficiais (Pós-pastejo 2008), provocado pelo pastejo

dos animais sobre o solo desestruturado, reduzindo o efeito residual da escarificação.

Tabela 3 – Atributos físicos do solo antes do pastejo dos animais e após os dois ciclos de pastejo, em área com integração lavoura pecuária com três diferentes sistemas manejos do solo.

| Preparo | Antes-pastejo (2007) | | | Pós-pastejo (2007) | | | Pós-pastejo (2008) | | | | | |
|--|----------------------|--------|--------|--------------------|-------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Camada (cm) | | | Média | Camada (cm) | | | Média | Camada | | Média | |
| | 0-7 | 7-15 | 20-30 | | 0-7 | 7-15 | 20-30 | | 0-7 | 7-15 | | 20-30 |
| Densidade (Mg m⁻³) | | | | | | | | | | | | |
| SD/SP | 1,48 | 1,51 | 1,44 | | 1,47 | 1,39 | 1,31 | | 1,46 | 1,48 | 1,3 | |
| Esc | 1,42 | 1,52 | 1,42 | | 1,36 | 1,38 | 1,4 | | 1,41 | 1,51 | 1,31 | |
| SD/CP | 1,45 | 1,48 | 1,43 | | 1,47 | 1,41 | 1,35 | | 1,49 | 1,44 | 1,36 | |
| Média | | | | 1,46 | | | | 1,39 | | | 1,42 | |
| Porosidade Total (m³ m⁻³) | | | | | | | | | | | | |
| SD/SP | 0,45 | 0,45 | 0,46 | | 0,45 | 0,49 | 0,5 | | 0,47 | 0,46 | 0,52 | |
| Esc | 0,47 | 0,44 | 0,47 | | 0,47 | 0,47 | 0,47 | | 0,49 | 0,45 | 0,51 | |
| SD/CP | 0,47 | 0,45 | 0,47 | | 0,44 | 0,46 | 0,48 | | 0,48 | 0,45 | 0,49 | |
| Média | | | | 0,46 | | | | 0,47 | | | 0,48 | |
| Microporosidade (m³ m⁻³) | | | | | | | | | | | | |
| SD/SP | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,43ab | 0,38 | 0,34 | 0,36 | 0,36 a | 0,42 | 0,41 | 0,38 | |
| Esc | 0,42 | 0,39 | 0,44 | 0,42ab | 0,38 | 0,39 | 0,4 | 0,39ab | 0,42 | 0,41 | 0,39 | |
| SD/CP | 0,44 | 0,43 | 0,41 | 0,43 a | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,38b | 0,42 | 0,39 | 0,4 | |
| Média | 0,43 A | 0,42 A | 0,43 A | | 0,38 A | 0,37 B | 0,38 A | | | | 0,4 | |
| Macroporosidade (m³ m⁻³) | | | | | | | | | | | | |
| SD/SP | 0,08 | 0,07 | 0,07 | | 0,07 | 0,08 | 0,1 | 0,08a | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,07a |
| Esc | 0,1 | 0,09 | 0,07 | | 0,06 | 0,15 | 0,14 | 0,11b | 0,05 | 0,04 | 0,13 | 0,09b |
| SD/CP | 0,07 | 0,07 | 0,1 | | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,07a | 0,04 | 0,03 | 0,1 | 0,06a |
| Média | | | | 0,08 | 0,06AB | 0,10AB | 0,10 A | | 0,05 A | 0,07 B | 0,11 A | |

Médias com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha diferem pelo teste DMS (P<0,05).

A resistência do solo à penetração foi maior no SD/CP antes do pastejo dos animais (agosto de 2007) até a profundidade de 0,10 m. Nas demais camadas, a RP apresentou um comportamento semelhante entre os sistemas e os valores ficaram abaixo de 2,2 MPa (Figura 1). Esse comportamento diferenciado da RP se deve à variação na densidade do solo, pois a umidade do solo foi homogênea no perfil em todos os sistemas, ficando em 23 % (Figura 2). Essa homogeneidade nos valores de umidade nas duas profundidades foi devido a uma chuva ocorrida um dia anterior à coleta dos dados.

A RP medida na linha de semeadura (RPL) aos 30 DAS da soja (Figura 4) teve valores semelhantes aos encontrados da primeira coleta de dados (Figura 1). Esse resultado pode ser atribuído ao efeito do sulcador da semeadora, que rompeu a camada compactada até a profundidade de 0,07 m. A resistência à penetração nas entre linhas da soja (RPEL) foram reduzidas significativamente pela escarificação (Figura 3), cujo efeito foi até a profundidade de 0,20 m. A umidade volumétrica do solo foi inferior na escarificação, o que indica que houve um aumento na quantidade de macroporos, que facilitam a drenagem e reduzem a capacidade de retenção de água.

A RP aos 72 DAS na cultura da soja foi semelhante em todos os sistemas, pois a umidade volumétrica (Figura 8) do solo esteve alta ($> 35\%$) no SD/CP e SD/SP (Figura 6 e 7). O Esc apresentou umidade significativamente menor na camada superficial ($< 25\%$), mas, mesmo assim, a RP não foi significativamente diferente dos outros sistemas. Esse comportamento diferenciado da RP se deve à menor densidade do solo sob escarificação, que reduz a resistência do solo, mesmo em condições de baixa umidade.

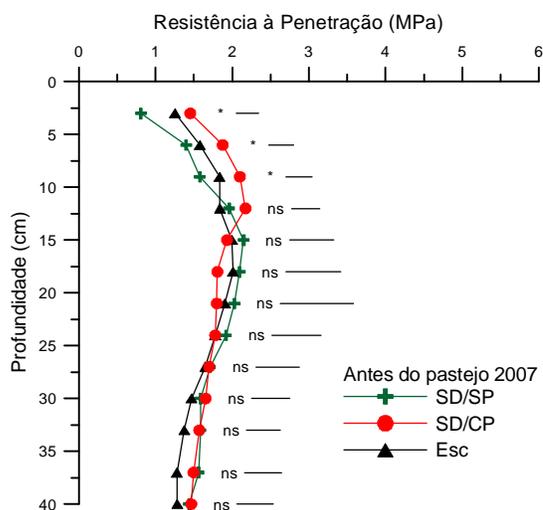


Figura 1 – Variação da resistência à penetração, antes do pastejo (agosto de 2007) dos animais e aplicação dos tratamentos. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

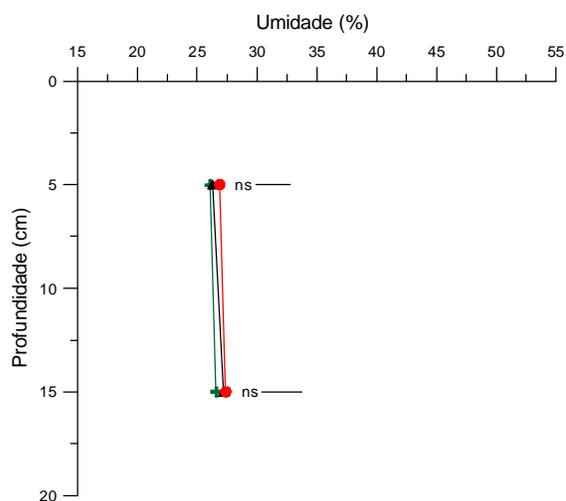


Figura 2 – Umidade volumétrica, antes do pastejo (agosto de 2007) dos animais e aplicação dos tratamentos. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

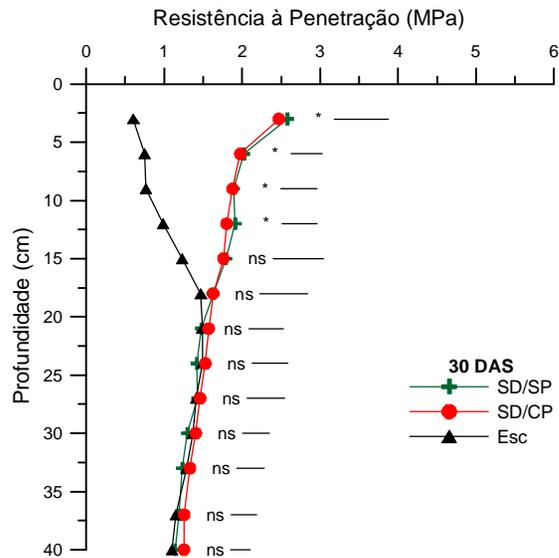


Figura 3 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

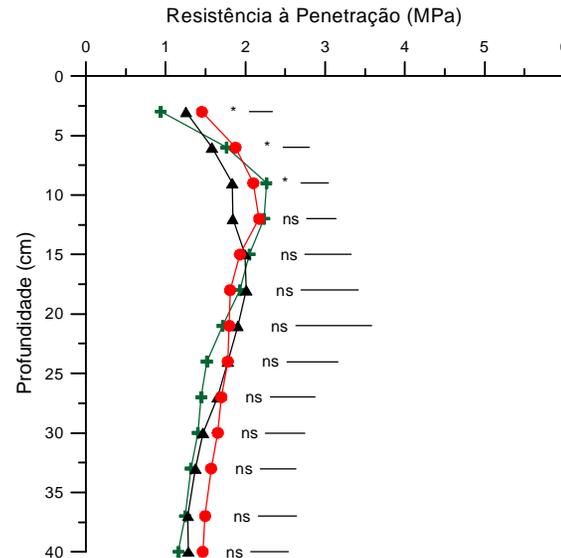


Figura 4 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

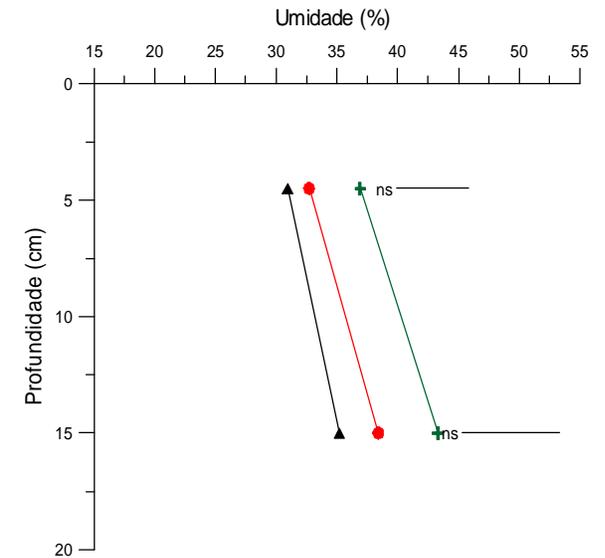


Figura 5 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 30 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

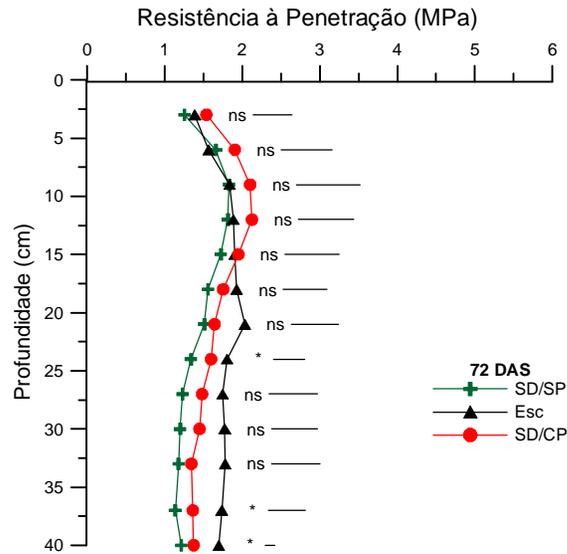


Figura 6 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

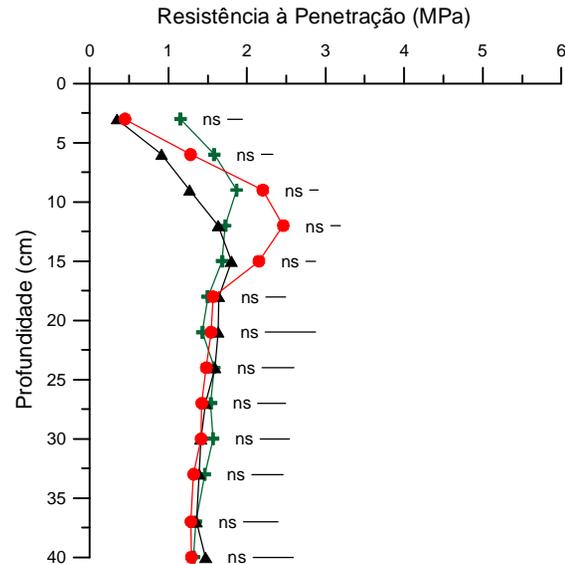


Figura 7 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

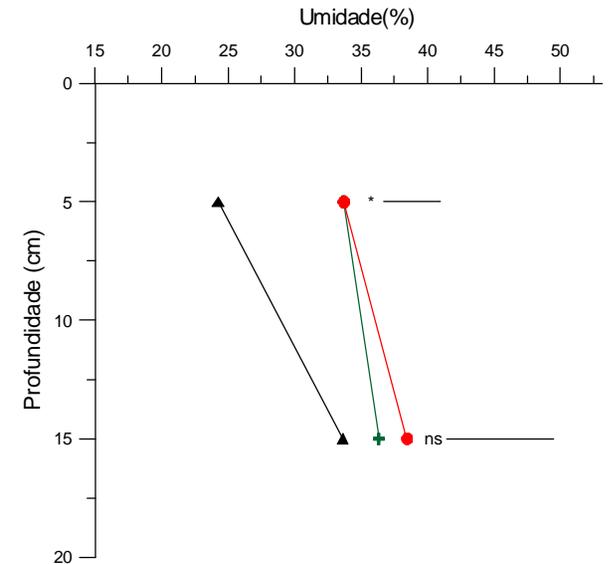


Figura 8 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 72 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

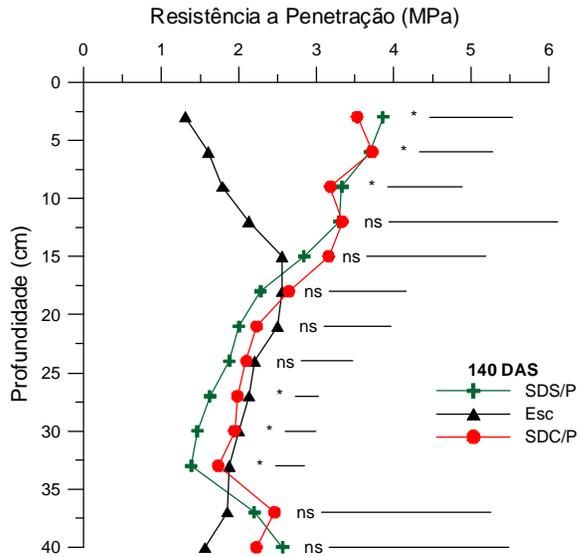


Figura 9 – Variação da resistência à penetração na entrelinha da cultura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

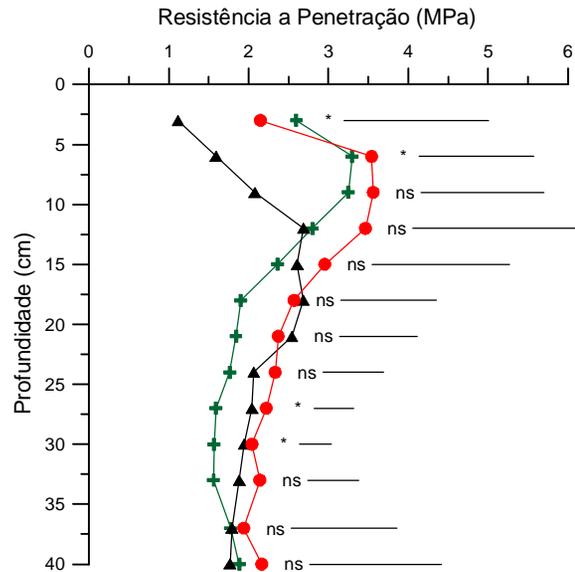


Figura 10 – Variação da resistência à penetração na linha de semeadura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

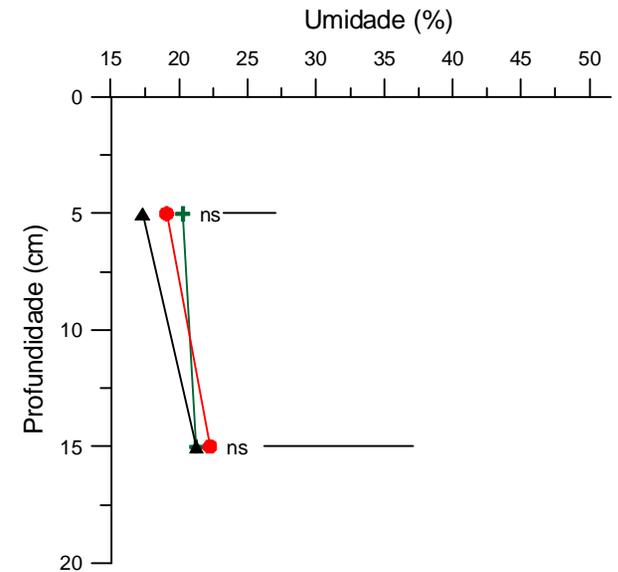


Figura 11 – Umidade volumétrica, na entrelinha da cultura da soja, 140 dias após a semeadura. Barras horizontais comparam os valores de θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

A resistência à penetração aos 140 DAS da soja atingiu os maiores valores durante o período de avaliação (Figura 9 e 10), pois a umidade volumétrica do solo ficou abaixo de 20 % (Figura 11) devido ao período prolongado sem precipitação (Figura 14). Os valores de RP acima de 2 MPa ocorreram no SD/CP e SD/SP e o maior incremento ocorreu na camada próxima aos 0,10 m, onde a densidade do solo foi maior e a macroporosidade menor. A escarificação apresentou menor RP até a profundidade de 0,20 m, onde ocorreu o efeito das hastes no rompimento das camadas compactadas.

Com a escarificação houve uma redução significativa na população de plantas (Tabela 4). Essa redução foi de 25 % na SD/SP, em relação a de 21,7% na SD/CP. Esse efeito negativo sobre a população de plantas está ligado, possivelmente, ao menor contato entre o solo e a semente na semeadura, o que dificulta a absorção de água pela semente e ou leva à desidratação da mesma pela alta temperatura que o solo revolvido atinge na superfície. Dessa forma, em sistemas que envolvem o revolvimento excessivo do solo, seria necessário aumentar a densidade de semeadura e realizá-la em condições de solo mais úmido, para evitar a desidratação da semente.

Tabela 4 – População de plantas nos diferentes sistemas de manejo do solo.

| Tratamentos* | População (planta ha ⁻¹) |
|--------------|--------------------------------------|
| SD/CP | 230.000 a |
| SD/SP | 240.000 a |
| Esc. | 180.000 b |

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste DMS (P<0,05).

*SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

O efeito diferenciado da RP entre os sistemas influenciou o crescimento radicular da soja. A escarificação proporcionou as melhores condições ao crescimento radicular das plantas, permitindo a sua ramificação e distribuição em todo perfil avaliado (Figura 12). Nos sistemas sob plantio direto contínuo (SD/CP e SD/SP) o crescimento foi menos vigoroso e com poucas ramificações. Em todas as condições, as raízes principais da soja atingiram os 0,30 m de profundidade,

indicando que a planta teve acesso à água e nutrientes dessas camadas em todos os manejos.

(a) SD/SP



(b) SD/CP



(c) Esc.



Figura 12 – Distribuição radicular da soja em diferentes sistemas de manejo, observada no perfil cultural (50 x 30 cm). (a) SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); (b) SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e (c) Esc. (preparo escarificado).

As plantas tiveram um crescimento diferenciado até os 65 DAS, sendo que a soja apresentou maior altura no SD/SP e menor no Esc (Figura 13). No entanto, no período de floração da soja (78 DAS) a altura das plantas se estabilizou e não houve diferenças significativas entre os sistemas. A altura de plantas (Figura 13) não teve uma relação direta com a distribuição do sistema radicular, enquanto que a produtividade apresentou uma relação direta com a altura. Houve diferença

significativa na altura entre os tratamentos e épocas de leitura. Na SD/SP a altura de plantas foi maior do que nos demais tratamentos (SD/CP e Esc.), e essa diferença permaneceu durante todo o ciclo da cultura. O tratamento escarificado apresentou menor altura de plantas e, conseqüentemente, menor produção de grãos ha^{-1} (Tabela 5). Dessa forma, foi observado que a escarificação apresentou diferença estatística para os tratamentos devido à menor retenção de água no solo, como discutido anteriormente.

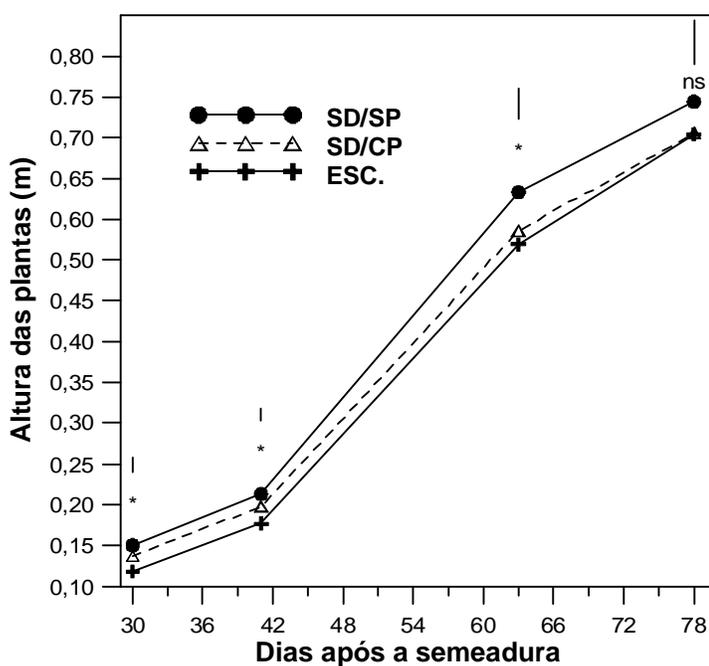


Figura 13 – Variação da altura de plantas de soja ao longo do ciclo da cultura. SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

A produção de grãos de soja foi menor com a escarificação em relação aos sistemas que mantiveram o plantio direto (Tabela 5). O SD/SP teve produtividade 32 % maior e o SD/CP 29 % maior em relação ao manejo escarificado. Dessa forma, a menor resistência à penetração e o crescimento radicular mais vigoroso não contribuíram para o aumento da produtividade da soja. Esse efeito se deve à menor retenção de água no manejo escarificado. Em vista disso, ocorreu maior efeito do

estresse hídrico durante o período de floração e enchimento de grãos, onde as chuvas foram menos frequentes (Figura 14).

A chuva acumulada na safra de soja em Ibirubá no ano de 2007/2008 no período de emergência da planta até a maturação fisiológica da soja, foi em torno de 500 mm, enquanto que a média de chuva anual da safra de soja 2006/2007 foi superior em 40%, de acordo com Defesa Civil RS (2006).

Tabela 5 – Produtividade da cultura da soja nos diferentes sistemas de manejo

| Tratamentos | Produtividade (kg ha⁻¹) |
|--------------------|---|
| SD/CP | 2.152 a |
| SD/SP | 2.048 a |
| Esc. | 1.461 b |

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste DMS (P<0,05). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal); SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

Ao longo do ciclo da cultura, houve uma grande flutuação no teor de água no solo, devido principalmente aos ciclos de umedecimento e secagem, conseqüência das precipitações e dos períodos de estiagem observados no período de avaliação (figura 14). Também, podemos observar que o mês de outubro apresentou uma maior taxa de precipitação, em torno de 319 mm, enquanto que, durante todo o ciclo da cultura, choveu apenas 388 mm de chuva, resultando em uma média mensal de 65 mm.

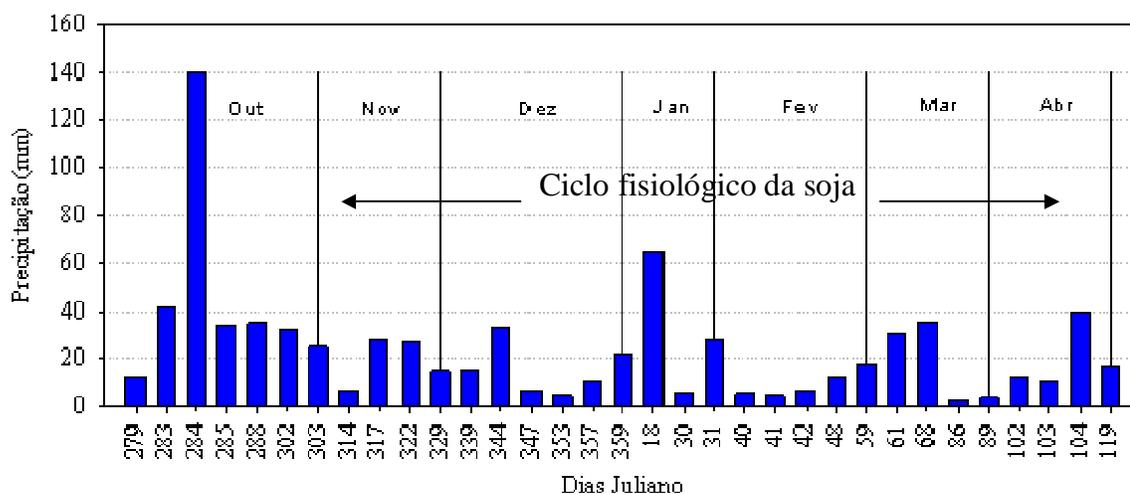


Figura 14 – Dados de precipitação pluvial, observados durante o ciclo de cultura da soja na safra 2007/08.

2.4 Discussão

A SD/CP apresentou maiores valores de Ds e Mi e menores valores de Ma e Pt na camada superficial, quando comparado ao da SD/SP e o Esc. (Tabela 3). De acordo com (HILLEL, 1982), a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica e diminui a porosidade total, em relação ao tamanho e continuidade dos poros. Para esse mesmo autor, reduções significativas ocorrem principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. Esse aumento do estado de compactação do solo é ocasionado pelo tráfego de máquinas e pisoteio de animais, mas também pode ocorrer pelo adensamento natural e acomodação de partículas (DE MARIA et al., 1999).

A densidade do solo encontrada nesse estudo pode ser considerada alta e já ultrapassa o valor considerado crítico para o adequado desenvolvimento das plantas. Em Latossolo argiloso, Klein & Câmara (2007) encontraram densidade crítica de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ pela metodologia do intervalo hídrico ótimo (IHO), independente do sistema de manejo. Reichert et al. (2003) consideram que

densidades acima de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos (> 70 % de argila) restringem o crescimento radicular das plantas. Principalmente em períodos secos, quando aumenta a resistência do solo há deformações morfológicas nas raízes e limitando o acesso à água e nutrientes das camadas mais profundas (COLLARES et al., 2008).

A macroporosidade do solo teve um aumento significativo com a escarificação e uma redução significativa com o pisoteio animal (Tabela 3). A redução da macroporosidade no manejo escarificado pode ser atribuída à baixa capacidade de suporte de carga dos solos desestruturados (SILVA et al., 2000), o que favorece a compactação superficial pelo pisoteio animal. Valores de macroporosidade abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem limitar as trocas gasosas (HILLEL, 1998), e a respiração das raízes pode ser limitada pela deficiência de oxigênio ou excesso de gás carbônico ou outros compostos resultantes da respiração anaeróbica que ocorre no solo nessas condições (BORU et al., 2003). Além disso, a redução na quantidade de macroporos dificulta o crescimento das raízes e reduz a taxa de infiltração de água no solo (LANZANOVA, 2007), o que pode favorecer o escoamento superficial.

O pisoteio dos animais provocou aumento nos valores de RP e, como consequência, ocasionou modificações morfológicas e fisiológicas nas raízes da soja. Tormena et al. (1998) confirmam que valores de resistência à penetração de 2 MPa começam a provocar redução do crescimento radicular. No entanto, para a cultura da soja, (KLEIN; VIEIRA 2007) consideram que a RP de 2 MPa não é limitante para a cultura. A compactação provoca condições adversas e inadequadas ao desenvolvimento de plantas (CAMARGO; ALLEONI 1997) e a resistência à penetração limita o crescimento radicular quando valores extremos de RP ocorrem durante longo período da fase vegetativa das culturas (COLLARES et al., 2006).

De acordo com Dexter & Watts (2000), a compactação é mais prejudicial em solo seco, pois em condições de maior umidade pode haver crescimento radicular em valores de RP superior a 4,0 MPa. Estudos em vasos, demonstraram que para um solo franco-argiloso, mantido com umidade próxima à capacidade de campo e aeração acima de 10 %, a densidade do solo de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ proporcionou uma resistência do solo de 3,5 MPa, e foi limitante ao crescimento de raízes de trigo (MEROTTO et al., 1999).

Na busca de uma solução rápida para a compactação, os produtores escarificam as áreas consideradas compactadas. Vieira (1985) atribui a esse tipo de preparo uma prática que atua diretamente sobre a estrutura, do solo afetando uma

série de atributos físicos no perfil deste. De acordo com Veiga et al. (2008), o preparo do solo aumenta a porosidade total e a macroporosidade e reduz a densidade do solo da camada superficial (0,00–0,05 m), porém esse efeito diminuiu com o tempo após as operações de preparo, devido à reconsolidação natural do solo. Com a escarificação ocorre aumento na taxa de infiltração de água e da condutividade hidráulica saturada (KLEIN; VIEIRA, 2007).

A escarificação proporcionou ao solo um ambiente livre de compactação facilitando, dessa forma, o desenvolvimento radicular da soja (Figura 12). De acordo com Silva et al. (2000), o milho cultivado em plantio direto apresentou, na camada de 0-0,40 m, menor densidade de raízes do que no plantio convencional, com concentração destas na camada até 0,10 m. Para Mello Ivo; Mielniczuk (1999), a densidade radicular não diferiu entre os tratamentos, mesmo com maiores valores de densidade do solo no plantio direto. De Maria et al. (1999) concluíram que o desenvolvimento radicular sofre restrições com valores de densidade acima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ num Latossolo Roxo.

A escarificação promoveu alterações bruscas nos parâmetros físicos, as quais interferiram principalmente na população das plantas e, como reflexo final e direto, ocorreu um decréscimo da produção de grãos de soja. Entretanto, alguns pesquisadores obtiveram resultados contraditórios aos deste ensaio. Os mesmos concluíram que a escarificação proporciona condições físicas e hídricas favoráveis ao desenvolvimento das plantas (CÂMARA et al., 2005).

O manejo dado ao solo foi muito importante no aumento ou redução da disponibilidade hídrica do mesmo. A perturbação do solo com o escarificador provocou uma diminuição no conteúdo de água, em relação aos tratamentos sem revolvimento, proporcionando ao solo elevada taxa de drenagem da água para camadas subsuperficiais. Resultados semelhantes foram encontrados por Hatano (1988). Quanto maior a densidade e menor a macroporosidade, maior será a capacidade de retenção de água (COLLARES et al., 2006). Hillel (1998) mencionam que a microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos, enquanto que a macroporosidade influencia diretamente na capacidade de infiltração e a drenabilidade da água no solo.

A maior diferença encontrada entre semeadura direta com e sem pisoteio animal, em relação ao escarificado, foi no conteúdo de água no perfil do solo. O solo sob semeadura direta reteve 36 a 45% mais água em relação ao solo escarificado. A

maior armazenagem da água na SD/SP pode ser atribuída ao revolvimento restrito à linha de semeadura, afetando menos a distribuição de poros e reduzindo também as perdas por evaporação. Devido à drenagem da água, ocorreu uma baixa disponibilidade hídrica para as raízes no solo escarificado, podendo ser considerado um dos motivos para menor altura e produção das plantas no escarificado em relação ao SD/CP e SD/SP. De acordo com Collares (2005), a escarificação do solo não promoveu o aumento da produtividade do feijoeiro e tampouco melhorou seus parâmetros de crescimento, quando os indicadores de qualidade física do solo não eram restritivos.

A baixa população de plantas no escarificado pode ser explicada pela exposição das sementes a condições adversas de temperatura e umidade dificultando a sua germinação (SILVA, 2003). Outro fator importante e talvez até mesmo o determinante seja o deficiente contato solo-semente que pode ser considerado o motivo do decréscimo da população e conseqüentemente diminuição da produção (HILLEL, 1998). O efeito da compactação sobre a produção de grãos varia com os anos, devido à variações na precipitação pluvial. Segundo Dias Junior (1996), a compactação do solo pode apresentar efeitos adversos como também efeitos benéficos, tais como melhoria no contato solo/semente e também aumento de disponibilidade de água em anos secos.

A produção de soja no sistema de semeadura direta sem pastejo foi superior ao manejo escarificado. De acordo com Silva (2003) a escarificação é uma prática que pode ser utilizada para diminuir a compactação em lavouras sob plantio direto, obtendo-se incremento na produtividade de grãos. Para Câmara (2005), os sistemas de manejo de solo adotados (escarificado e plantio direto) não apresentaram diferença de produção de grãos, em função da precipitação pluvial de 999,8 mm durante todo o ciclo da cultura, com isso não provocando stress hídrico na planta. Esse pode ser considerado um dos diferenciais para este experimento, pois a precipitação ocorrida durante o ciclo fisiológico da planta foi de 388 mm de chuva na safra 2007/08, contribuindo, dessa forma, para a permanência da planta no solo por maior parte do tempo sob deficiência hídrica. Com isso, o efeito negativo da escarificação foi maximizado.

Analisando os dados como um todo, pode-se concluir que a escarificação não é considerada uma forma viável para reduzir o efeito da compactação do solo, pois a produção de soja foi inferior ao tratamento com pisoteio animal. O pousio durante

dois anos consecutivos sem pisoteio animal, também não foi a melhor forma de solucionar o problema para o produtor.

2.5 Conclusão

A presença dos animais provocou alterações na densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo manejado sob plantio direto, comprovando que nessas condições há um aumento na compactação do solo.

A escarificação não pode ser considerada o melhor preparo, pois esta diminui a umidade do solo comparada com os demais tratamentos.

Em valores de umidade abaixo de 20%, obteve-se valores de resistência à penetração acima de 2 MPa, demonstrando que há uma relação direta entre esses dois parâmetros físicos do solo.

A escarificação esporádica em solos manejados sob integração lavoura-pecuária em plantio direto proporciona condições físico-hídricas do solo menos favoráveis ao desenvolvimento das plantas, pois nesse caso ocorreu uma diminuição na altura e conseqüentemente menor produção de grãos. Este resultado foi obtido devido ao déficit hídrico ocorrido durante o desenvolvimento da cultura.

O crescimento radicular da soja foi maior em profundidade no escarificado e no plantio direto sem pisoteio, por não ter encontrado impedimento devido à compactação do solo que o plantio direto com pisoteio apresentou. Entretanto, como foi uma safra de baixa precipitação, houve uma maior produção neste último preparo, devido a maior ramificação lateral do sistema radicular aumentando a área de extração de água e nutrientes.

O solo escarificado sofreu alterações impostas pelo pisoteio dos animais, reduzindo o efeito residual deste tipo de preparo.

3 CAPÍTULO II POROSIDADE DE AERAÇÃO E COMPRESSIBILIDADE DE UM LATOSSOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar a relação entre a permeabilidade ao ar (K_a), espaço aéreo (ϵ_a), curva de retenção de água (CRA), tensão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (IC) do solo sob o efeito de pisoteio animal em sistemas de manejo do solo. O experimento foi instalado no ano de 2007, numa área agrícola comercial, no município de Ibirubá (RS). O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: semeadura direta sem pastejo (SD/SP), semeadura direta com pastejo (SD/CP) e escarificado (Esc). As amostras foram coletadas em três camadas 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m, e em duas épocas pós-pastejo em dezembro de 2007 e pós-pastejo em outubro de 2008. As amostras de solo foram preparadas, saturadas por capilaridade e submetidas aos tensões de 0,001; 0,004; 0,006; 0,01; 0,03 e 0,1 MPa. A umidade na tensão de 0,5 e 1,5 MPa foi obtida com WP4. Após o equilíbrio em cada tensão, foi determinada a massa da amostra e fluxo de ar para calcular a determinação da CRA e para calcular a permeabilidade do solo ao ar (K_a). A compressibilidade foi determinada em amostras coletadas após o primeiro ciclo de pisoteio dos animais (dezembro de 2007), nas camadas de 0-0,07 e 0,07-0,15 m. Essas amostras foram saturadas por capilaridade equilibradas à tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa. A σ_p e os C_c foram obtidos das curvas de compressão do solo. A maior permeabilidade ao ar foi observada nos menores potenciais matriciais (maiores tensões) e na camada superficial do solo, onde há maior presença de macroporos. Houve uma relação direta entre a permeabilidade ao ar e o espaço aéreo do solo. A pressão aplicada pelo tráfego dos animais proporcionou maiores valores de tensão de preconsolidação na camada superficial. A escarificação do solo provocou menor capacidade de suporte e maior suscetibilidade à compactação na camada superficial.

3.1 Introdução

O controle da compactação do solo é considerado uma exigência contínua para a agricultura moderna, especialmente com o amplo uso de máquinas pesadas e o repetido pisoteio dos animais no campo, muitas vezes na condição de umidade mais favorável a compactação. De acordo com Hillel (1998), um solo compactado apresenta uma maior quantidade de poros pequenos e os poros grandes são descontínuos, o que torna um ambiente não adequado para o desenvolvimento das raízes.

Um solo compactado apresenta um menor espaço para ar e água, necessários para o crescimento das raízes, e também é considerado um ambiente difícil para a penetração das raízes. Para um adequado crescimento, as plantas necessitam de uma estrutura que possibilite uma área de contato entre as raízes e o solo, segure a obtenção de água e nutrientes e propicie um espaço poroso suficiente para o fornecimento adequado de oxigênio (LIMA, 2004). Os microporos do solo são responsáveis pela retenção de água, enquanto os macroporos, após a rápida drenagem, são os responsáveis pela aeração (HILLEL, 1998). Baseado neste aspecto, Streck (2007) afirma que mais importante que a porosidade é a continuidade de poros, pois poros obstruídos não contribuem para a realização da troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

A melhor maneira para a água e o ar se deslocarem no solo é pelos poros criados por raízes de plantas e pela mesofauna do solo. Dessa maneira, a drenagem ocorre de forma rápida e os poros ficam preenchidos com ar, dando a esses solos uma capacidade de retenção de ar de 20 a 30% do volume, enquanto que um solo compactado pode reter em torno de apenas 5 % do volume total (HILLEL, 1998). Segundo Cannel (1977), as raízes possuem a função de formar poros mais estáveis (macroporos), pois elas crescem deslocando partículas quando a pressão aplicada é maior que a resistência oferecida pelo solo. Fontanella (2008) verificou a relação entre características físicas e hídricas de um Latossolo sob plantio direto a 13 anos, escarificado em diferentes épocas, níveis de tráfego e mata nativa, e concluiu que houve aumento da permeabilidade ao ar na camada superficial do solo, onde ocorreu a maior presença de macroporos.

O fluxo de ar preferencial ocorre pelos macroporos grandes e contínuos a permeabilidade ao ar medida próxima à capacidade de campo permite uma boa estimativa da condutividade da fração de poros grandes Iversen et al. (2003). Corcini (2008) encontrou um aumento no valor de permeabilidade ao ar no preparo convencional, sendo ocasionado pelo consequente aumento da macroporosidade. Por outro lado, assume-se que a porosidade de aeração mínima, a partir da qual as raízes da maioria das culturas podem se desenvolver, em torno de 10% do volume (KIEHL, 1979; KLEIN; LIBARDI, 2002).

A permeabilidade do solo ao ar é o coeficiente que governa o fluxo convectivo do ar no solo, e está relacionado ao tamanho e continuidade da porosidade de aeração (HILLEL, 1998). Ela não é apenas importante para aeração do solo, mas também é um indicador que revela as mudanças na eficiência e funcionalidade do sistema poroso, sendo um indicativo da deformação (PETH; HORN, 2006).

Pressões externas aplicadas como o tráfego de máquinas no plantio direto e o pisoteio dos animais podem provocar obstrução de poros grandes e formar poros pequenos, os quais são menos eficientes na condução de água e ar. Com este propósito, Seker e Isildar (2000) estudaram a condutividade do ar submetido ao tráfego de máquinas agrícolas e observaram que, com a passagem do trator, ocorreu um aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade total e da condutividade ao ar. Resultados semelhantes foram encontrados por Balbuena et al. (2000), os quais concluíram que o tráfego de máquinas provoca alterações nas propriedades físicas do solo na camada de 0 à 0,50 m de profundidade.

A aplicação de pressão em solos com qualquer estado intermediário entre seco e saturado (solo úmido) resultará, primeiramente, em expulsão do ar e uma aproximação do gradual de saturação do solo; após todo o ar ser dirigido para fora, ocorre à remoção da água (HILLEL, 1998). O teor de água intermediário é considerado o diferencial para a facilidade do solo em se deformar, ficando vulnerável ao processo de compactação (LARSON, 1980). Quando o solo seco possui uma alta capacidade de suporte, não ocorrendo o processo de compactação.

Atualmente, no Brasil, há uma tendência de avaliar a suscetibilidade do solo à compactação com o uso de parâmetros obtidos da curva de compressão, buscando determinar as condições ideais para executar as operações mecanizadas no campo. Dessa forma, busca-se medidas preditivas e preventivas da compactação, o que

minimizaria os problemas de degradação dos solos agrícolas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2000).

A compressibilidade do solo é uma forma de avaliar a suscetibilidade à compactação e a capacidade de suporte do mesmo. Mediante a curva de compressão (Figura 15), que considera o índice de vazios ou a densidade com o logaritmo da pressão aplicada, obtém-se a tensão de pré-consolidação (σ_p), que é um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) e o coeficiente de compressão (IC), que é um indicativo da suscetibilidade à compactação adicional (SILVA; CABEDA, 2006).

O termo compressibilidade do solo representa a resistência deste ao decréscimo de volume quando submetido a uma dada pressão (HORN; LEBERT, 1994). A compressibilidade não é somente determinada pelas características do solo (textura e umidade), mas também pela intensidade e freqüência e tipo de sistema de pastejo adotado (DEFOSSEZ; RICHARD, 2002).

A compactação é considerada o fruto de uma pressão aplicada na superfície. Em relação à pressão exercida pelos animais, os valores atingidos podem girar em torno de 350 a 400 kPa (PROFFITT et al., 1993; BETTERIDGE et al., 1999). Estes valores podem duplicar quando o animal se encontra em movimento (NIE et al., 2001). Só para questão de comparação, uma máquina agrícola representa uma pressão entre 50 a 300 kPa no solo (SILVA et al., 2000).

No Brasil, Kondo (1999), realizando estudos em Latossolos da região de Lavras (MG), demonstrou que a compressibilidade do solo é influenciada pelo sistema de manejo, e este pode interferir de maneira significativa no desenvolvimento das plantas. Segundo Horn et al. (1988), quanto maior o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada.

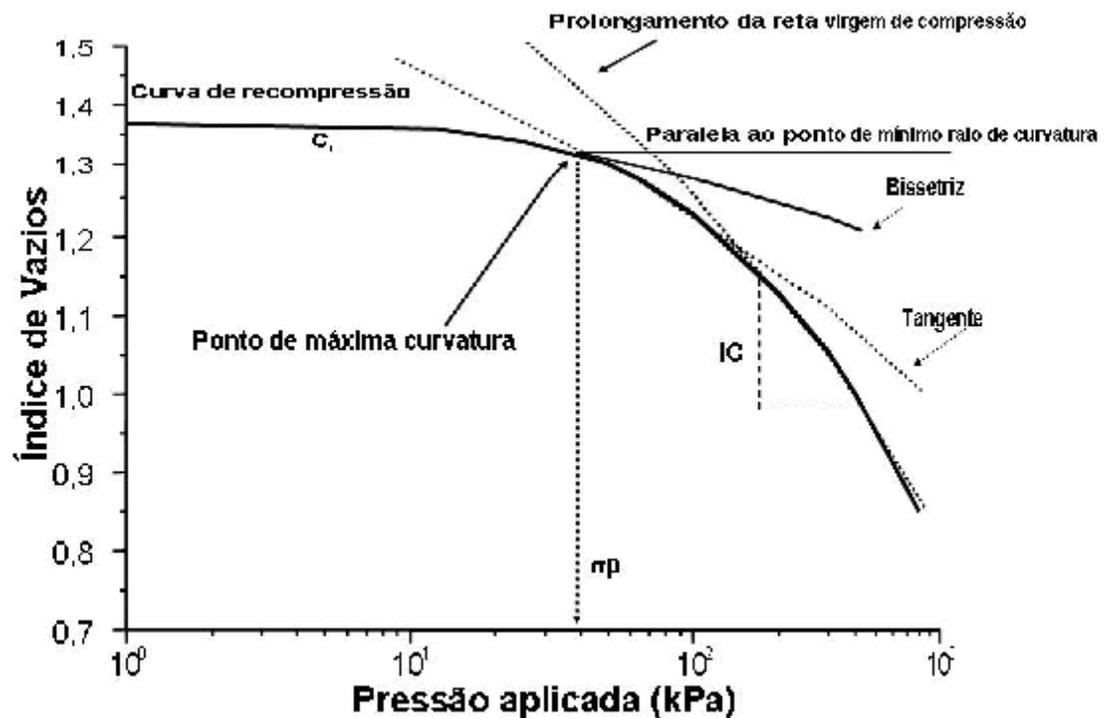


Figura 15 – Diagrama para determinação da s_p e IC.

Este estudo teve como objetivo analisar o efeito do pisoteio animal em diferentes sistemas de manejo do solo sobre a permeabilidade do solo ao ar, espaço aéreo, curva característica de retenção de água e a capacidade de suporte de carga do solo.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi instalado no ano de 2007, numa área agrícola comercial de propriedade do senhor Valério Kunz, situada na região fisiográfica do Planalto Médio, no município de Ibirubá (RS) (28°38'34" de latitude sul, 53°02'43" de longitude oeste e aproximadamente 420 m de altitude) na região norte do estado. O clima da região enquadra-se na classificação de Köpen, zonas Cfa e Cfb (clima

subtropical úmido com verões quentes ou amenos). O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), cuja análise granulométrica é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostradas.

| Camada | Areia | Silte | Argila |
|---------------|---------------------------|--------------|---------------|
| m | kg kg⁻¹ | | |
| 0,00 – 0,07 | 0,222 | 0,255 | 0,552 |
| 0,07– 0,15 | 0,203 | 0,213 | 0,583 |
| 0,20– 0,30 | 0,189 | 0,191 | 0,620 |

A área onde foi instalado o experimento foi utilizada com integração lavoura-pecuária sob plantio direto desde 1998, com milho ou soja no período primavera/verão, aveia + azevém, no outono/inverno, com pastejo animal direto.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: semeadura direta sem pastejo (SD/SP), semeadura direta com pastejo (SD/CP) e escarificação (Esc.). As parcelas possuíam as dimensões de 15 metros de comprimento e 7 m de largura (105 m²). No tratamento SD/SP considerado como testemunha, as parcelas permaneceram cercadas durante todo o inverno. Nas parcelas do SD/CP, os animais pastejaram livremente, durante todo o período de inverno. A escarificação foi realizada com um escarificador de cinco hastes, até uma profundidade de 0,20 m e, após, efetuou-se o nivelamento superficial do terreno com o uso de uma grade de 28 discos. Essa operação foi realizada antes da semeadura da soja.

A semeadura de soja, variedade Codetec 212, foi realizada no dia 15 de novembro de 2008, com densidade de 240.000 sementes ha⁻¹. A adubação de base foi definida a partir da análise química do solo da área. Utilizou-se 300 kg ha⁻¹ da fórmula 02-20-30, seguindo-se as indicações oficiais de recomendação de adubação e calagem para o Rio Grande do Sul (CQFS, 2004). Para a semeadura, utilizou-se uma semeadora-adubadora para plantio direto da marca Vence Tudo com 5 linhas espaçadas em 0,45 m, dotada de sulcador tipo facão. O trator utilizado foi da marca Massey Ferguson, modelo 265.

A curva de retenção de água, a permeabilidade ao ar, e o espaço poroso foram determinados em amostras do solo coletados com estrutura preservada. As amostras foram coletadas em anel volumétrico de 0,06 m de diâmetro e 0,05 m de alturas, no centro das camadas de 0-0,07; 0,07-0,15 e 0,20-0,30 m. Foram coletadas em duas épocas: pós-pastejo (2007) – representa a 2ª coleta de dados no mês de dezembro de 2007 e pós-pastejo (2008) – representa a 3ª coleta de dados que foi realizada em outubro de 2008. Na tabela 7 estão descrito as atividades realizadas desde a demarcação do experimento até o encerramento do mesmo. Os índices de compressão do solo foram avaliados no pós-pastejo (2007) – que representa a 2ª coleta de dados no mês de dezembro de 2007. Na tabela 2 consta o cronograma de atividades de campo durante a execução do experimento.

Após o preparo das amostras em laboratório, estas foram saturadas por capilaridade elevando gradualmente a lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Quando as amostras estavam saturadas, foram aplicados, em mesa de tensão, as tensões de: 0,001; 0,004; 0,006; 0,01 MPa em mesa de tensão, segundo método de Reinert; Reichert, (2006); e 0,03; 0,1 MPa mediante pressões aplicadas em placas porosas, conforme Klute (1986).

Após atingir o equilíbrio em cada tensão, mediu-se o fluxo de ar nas diferentes tensões da curva. Após o ponto de 0,1 MPa as amostras foram secas à 105 °C-110°C, para determinar o conteúdo de água e a massa seca do solo.

3.2.1 Curva de retenção de água (CRA)

A curva de retenção de água no solo foi obtida pela relação entre o potencial de água (kPa) e a umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) da amostra. Foram utilizadas três técnicas para obtenção dos pontos da curva de retenção de água a mesa de tensão, a câmara de pressão de Richards (painéis de pressão) e os pontos mais secos da CRA (500 e 1500 kPa), obtidos no medidor de potencial de água no solo (“Dew point potentiometer” – WP4).

Os dados de conteúdo de água, obtidos em base de massa (umidade gravimétrica), foram multiplicados pela densidade do solo determinada nas mesmas

amostras com estrutura preservada para calcular a umidade volumétrica. Assim, reuniram-se em uma mesma curva os pontos de umidade (θ) x potencial (ψ), da mesa de tensão, do aparelho de placas porosas de Richards e do potenciômetro do ponto de orvalho.

Para a obtenção dos pontos da curva, ajustou-se o modelo de van Genuchten (1980) aos valores de potencial e umidade, com o uso do programa Soil Water Retention Curve – SWRC (DOURADO NETO et al., 2000), conforme equação:

$$q = q_r + \frac{(q_s - q_r)}{[1 + (ay)^n]^m} \quad (7)$$

onde:

q = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

q_R = umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

q_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

y_m = potencial matricial (kPa);

a , m , n = parâmetros de ajuste do modelo.

3.2.2 Permeabilidade ao ar (K_a) e espaço aéreo (ϵ_a)

Após o equilíbrio da umidade em cada ponto da curva de retenção de água, a amostra foi submetida à determinação de condutividade ao ar K_i (cm s^{-1}), no qual foi usado um permeâmetro de aplicação constante de pressão de ar (Figura 16). O fluxo é considerado a quantidade de ar que passa por determinada amostra de solo e, com base neste, pode-se calcular a permeabilidade do solo ao ar (K_a). A chegada do ar ao permeâmetro é na forma de fluxo turbulento; dessa forma há a necessidade de uma válvula de precisão para rebaixar esse fluxo para laminar, tornando possível a leitura da quantidade de ar que passa na amostra de solo.

O permeâmetro é formado por fluxímetros com diferentes vazões, por onde o ar flui antes de passar pela amostra de solo. A escala dos fluxímetros variam entre $0,1 \text{ L min}^{-1}$ até 10 L min^{-1} , a qual é regulada por uma válvula de precisão. Essa diferença de pressão entre o ambiente e o fluxo de ar no equipamento é medida por

um manômetro, sendo um valor é padronizado para todas as amostras. Maiores detalhes técnicos sobre o equipamento e seu funcionamento estão descritos em Vossbrink, (2005).

A K_l é calculada a partir da quantidade de ar que passa numa determinada amostra, através da equação:

$$K_l = r_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad [8]$$

A partir do valor de valor de (K_l) pode-se calcular a permeabilidade ao ar $K_a \mu\text{m}^2$), como:

$$K_a = K_l \frac{h}{r_l g} \quad [9]$$

onde:

K_l = condutividade ao ar (cm s^{-1});

r_l = densidade do ar na hora da medição (kg m^{-3});

g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$);

ΔV = quantidade de ar que passa pela amostra no Δt (m^3);

l = altura da amostra (m);

Δp = pressão do ar que passa pela amostra (10 cm);

A = área superficial do anel (m^2);

h = viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

O espaço aéreo (ϵ_a) foi calculado como a diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água para um dado potencial mátrico específico atribuída a determinada amostra.

3.2.3 Teste de compressão uniaxial

As amostras foram coletadas com estrutura preservada após o pisoteio dos animais, em anel volumétrico de 0,06 m de diâmetro e 0,025 m de altura, no centro das camadas de 0-0,07 e 0,07-0,15 m, totalizando 162 amostras.

Após o seu preparo as amostras, foram saturadas por capilaridade e, em seguida, homogeneizadas quanto ao potencial matricial em câmara de pressão de Richards, com tensão de 33kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600kPa, seguindo a norma NBR-12007/90 (ABNT, NBR 12007, 1990). Para cada carregamento utilizou-se um intervalo de tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99% da deformação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga. Foi utilizado o consolidômetro de marca Boart Longyear com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. As amostras, após a aplicação das diferentes cargas, foram colocadas em estufa para a secagem a 105 °C por 24 horas, para determina a umidade.

A pressão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressão (IC) do solo foram determinados pelo método de Casagrande (1936) com ajuste manual (método 2) no programa computacional Compress (REINERT et al., 2003).

A análise estatística constou de análise de variância e comparações de médias pelo teste DMS a 5% de probabilidade.

3.3 Resultados

A relação entre a permeabilidade do solo ao ar e o y_m da água no solo nas três camadas, três sistemas de manejo e duas épocas de coleta estão representados na (Figuras 17 e 18). Ocorreu diferenciação no comportamento entre os valores nos tratamentos e nas profundidades. Contudo, sempre houve um incremento da K_a com a diminuição do potencial matricial de água do solo.

Os pontos da curva de K_a apresentaram uma elevada variabilidade amostral em todos os sistemas e camadas analisadas. A variação dos valores de K_a foi

reduzindo, com a diminuição dos y_m pois, na medida que o y_m reduz, aumenta o volume de poros vazios. Esse incremento no valor de K_a ocorre devido à drenagem da água dos poros maiores (macroporos), favorecendo a passagem do ar pela amostra.

Do maior potencial para o menor potencial se obteve um incremento de K_a de $0,6 \mu\text{m}^2$. Além disso, observou-se que nos potenciais menores de 10 kPa os valores de K_a não tiveram muita variação. Analisando a figura 18 pós-pastejo (outubro de 2008), percebe-se um incremento nos valores de K_a em relação ao pós-pastejo (dezembro de 2007) (Figura 17), independente dos tratamentos e camadas analisadas.

Esse acréscimo nos valores de K_a ocorreu em 50% dos pontos amostrados, os quais ficaram superiores a $1 \mu\text{m}^2$ em relação à pós-colheita (outubro de 2008), e obteve-se 20% dos valores superiores a $1 \mu\text{m}^2$ em relação a 1ª coleta. O escarificado apresentou uma maior K_a , principalmente na camada subsuperficial do solo para a superficial e esse valor aumentou conforme o aumento do y_m da água no solo.

Em relação à curva de retenção de água no solo, observou-se similaridade entre os sistemas, profundidade e nas diferentes épocas de coleta de solo (Figuras 20 e 21). Houve um decréscimo gradativo do conteúdo de água no solo para os potenciais maiores, desde a saturação até a tensão de 100 kPa. Obteve-se um decréscimo acentuado nos valores nas tensões de 500 e 1.500 kPa, os quais foram obtidos com aparelho WP4. O maior teor de água para o solo saturado foi obtido na camada de 0,00 a 0,07 m e a menor na de 0,07 a 0,15 m. Esse comportamento da curva não é considerado normal, pois o ponto de saturação deveria ser maior, pois houve problemas na saturação das amostras, por estarem com elevada compactação. De acordo com a figura 19, observou-se uma relação direta entre K_a e o ϵ_a do solo nos diferentes tratamentos e camadas analisadas.

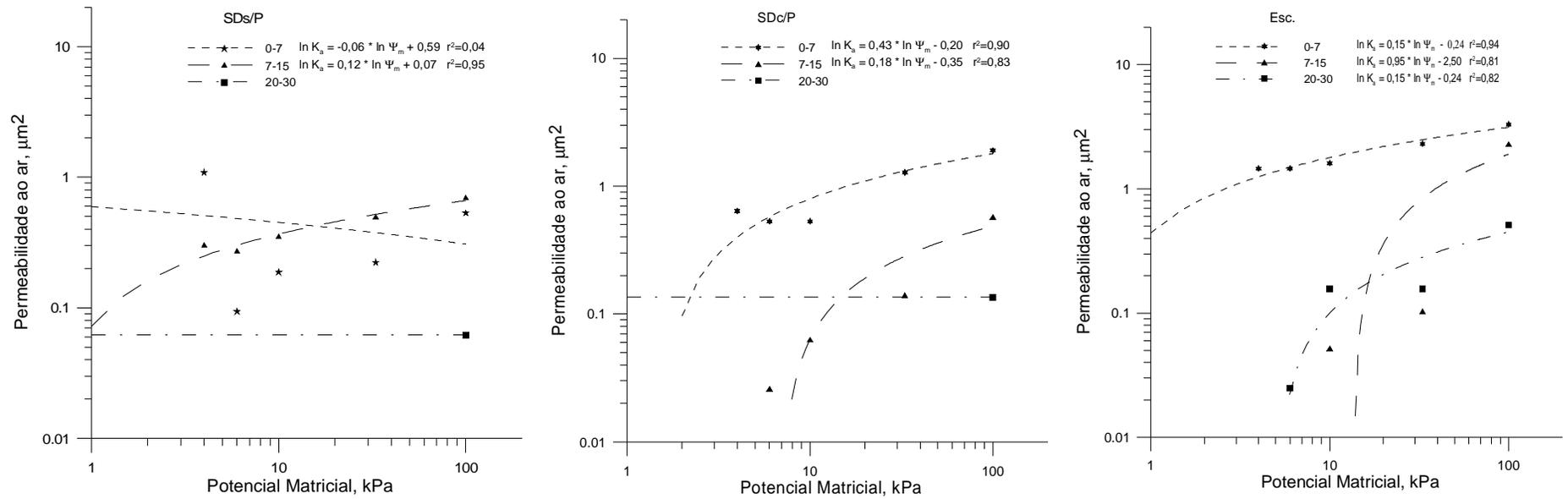


Figura 16 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo após o pastejo (dezembro de 2007). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

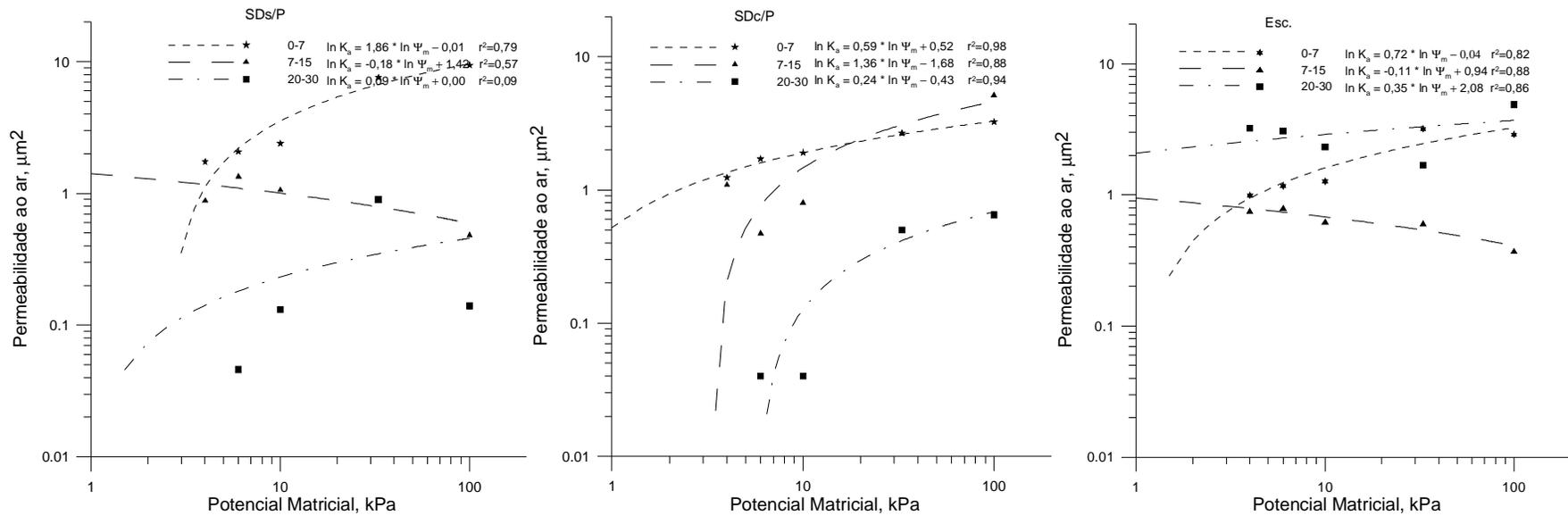


Figura 17 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo após o pastejo (outubro de 2008). SD/SP (semeadura direta sem pisoteio animal), SD/CP (semeadura direta com pisoteio animal) e Esc. (preparo escarificado).

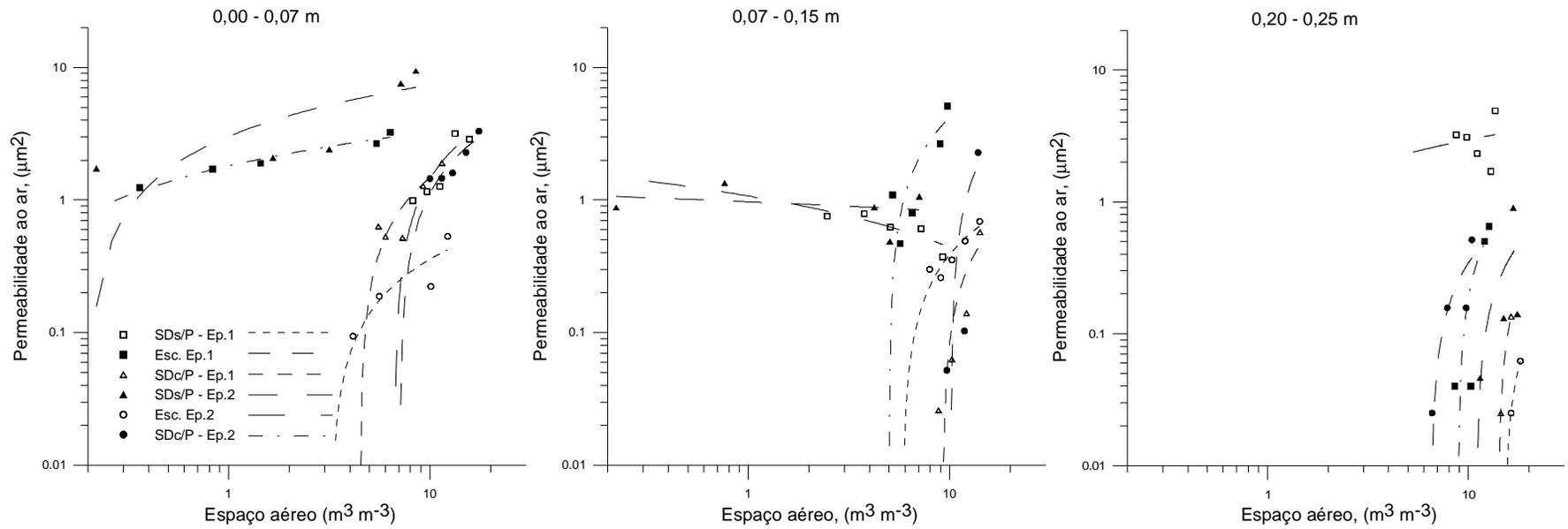


Figura 18 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o espaço aéreo (ϵ_a) para os sistemas estudados (SD/SP, Esc. e SD/CP), nas duas épocas, nas três camadas. SD/SP (semeadura direta sem pisoteio); Esc. (escarificado); SD/CP (semeadura direta com pisoteio). Pós-pastejo (dezembro de 2007) e pós-pastejo (outubro de 2008).

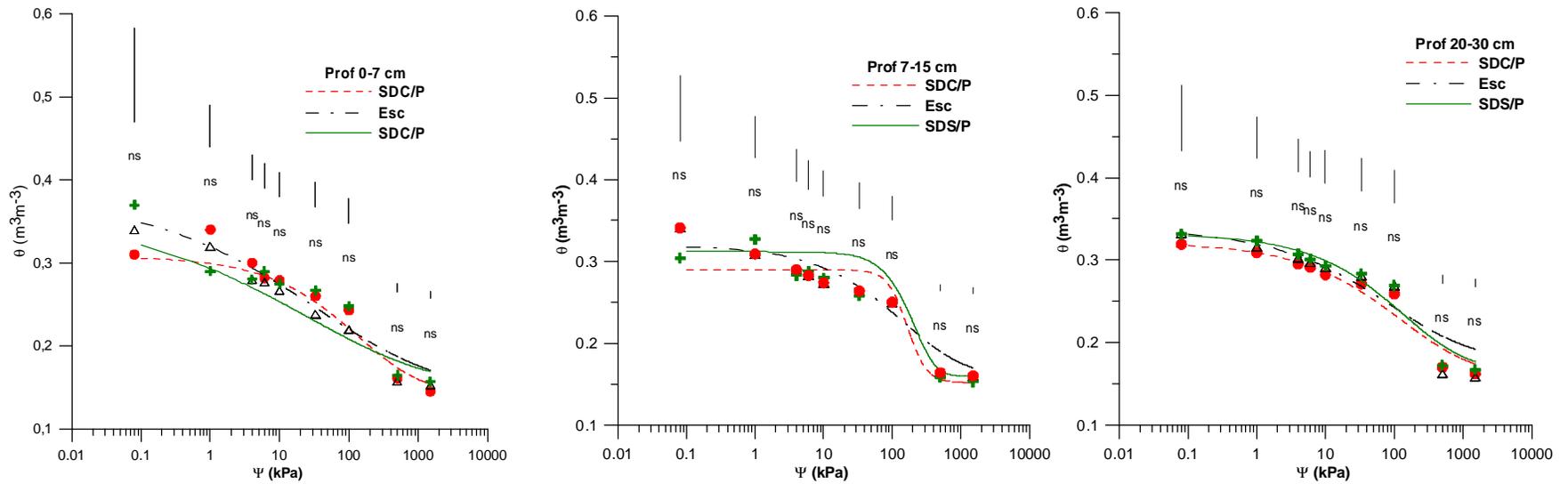


Figura 19 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten na semeadura direta com pisoteio (SD/CP), escarificado (Esc) e semeadura direta sem pisoteio (SD/SP), coleta realizada pós-pastejo (dezembro de 2007).

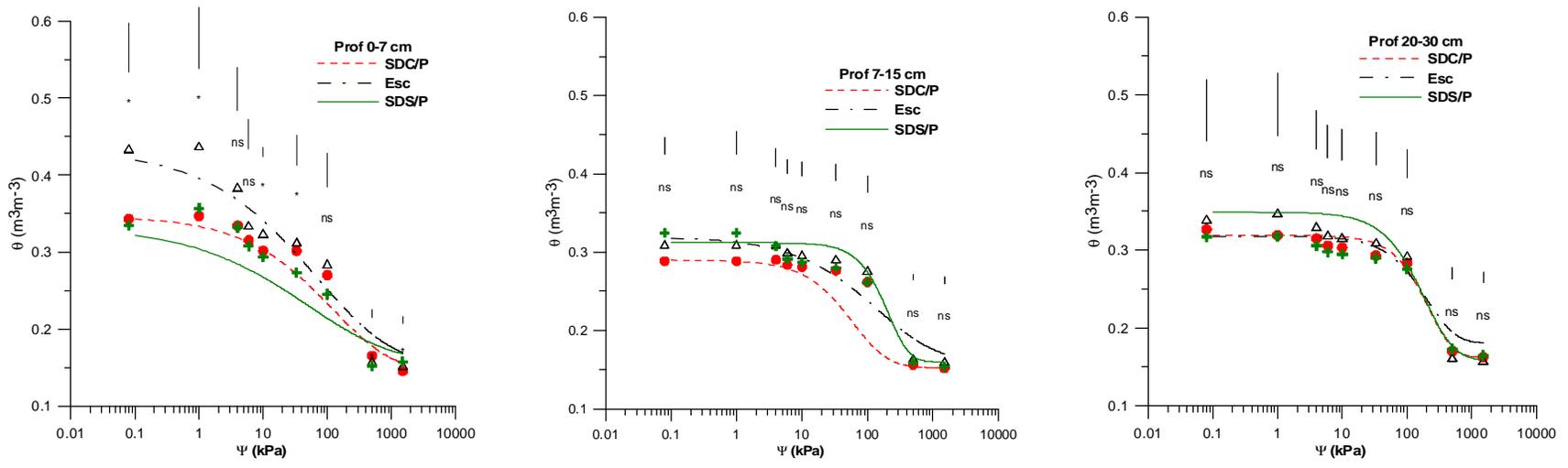


Figura 20 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten na semeadura direta com pisoteio (SD/CP), escarificado (Esc) e semeadura direta sem pisoteio (SD/SP), coleta realizada pós-pastejo (outubro de 2008).

Na Tabela 7 constam os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) e, na (Tabela 8), os valores de índice de compressão (IC). A pressão de pré-consolidação (σ_p) apresentou diferença significativa entre os sistemas e as camadas analisadas. A camada superficial (0,00 a 0,07 m) apresentou os menores valores de σ_p , para os tratamentos SD/SP e Esc e os maiores valores para o tratamento SD/CP. Na camada superficial os valores de σ_p indicam que níveis de pressões aplicadas ao solo maiores do que a σ_p para determinada umidade acarretam compactação adicional do solo. O Esc foi o manejo com o menor σ_p e, portanto é mais suscetível à compactação.

Tabela 7 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) nos diferentes sistemas manejos do solo e nas camadas amostradas.

| Tratamentos | Camada (cm) | | Média |
|--------------|-------------|----------|----------|
| | 0-7 | 7-15 | |
| SD/SP | 97,06 | 122,91 | 109,98 A |
| Esc | 86,97 | 101,39 | 94,18 B |
| SD/CP | 134,21 | 126,82 | 130,51 A |
| Média | 106,08 b | 117,04 a | |

SD/SP-semeadura direta sem pisoteio animal, SD/CP-semeadura direta com pisoteio animal e (Esc)- Escarificado. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

O índice de compressão (IC) não apresentou diferença significativa entre os manejos e para as camadas analisadas e seus valores estão representados na Tabela 8. O IC apresentou maiores valores no Esc (0,42) na camada superficial e esse valores reduziram na SD/SP (0,38) e SD/CP (0,37). Dessa forma, o IC foi influenciado pelo estado de compactação e, de forma geral, pelo manejo do solo e pelo pisoteio dos animais. Na segunda camada, os valores permaneceram com mesma tendência, obtendo-se o maior valor para o escarificado. Desta forma podemos dizer que a escarificação leva a uma maior suscetibilidade do solo à deformação. Altos valores de IC sugerem uma boa estabilidade estrutural ou a ocorrência do processo de compactação no solo, sendo esta desfavorável ao crescimento das plantas.

Tabela 8 – Valores médios de índice compressão (IC) nos diferentes sistemas manejos do solo e nas camadas do solo em estudo.

| Tratamentos | Camada (cm) | | Média |
|--------------|-------------|------|---------|
| | 0-7 | 7-15 | |
| SD/SP | 0,38 | 0,29 | 0,33 |
| Esc | 0,42 | 0,37 | 0,39 |
| SD/CP | 0,37 | 0,28 | 0,32 |
| Média | 0,39 | 0,31 | 0,35 Aa |

SD/SP-semeadura direta sem pisoteio animal, SD/CP-semeadura direta com pisoteio animal e (Esc)-Escarificado. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

3.4 Discussão

A K_a apresentou decréscimo na camada superficial para a subsuperficial do solo, em função da redução de volume de macroporos. Essa mesma relação foi obtido por Streck, (2007), que determinou a condutividade do ar em solos submetidos a diferentes manejos e concluiu que a condutividade ao ar se mostrou bastante dependente dos macroporos, expressando as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi afetada.

Elevados valores de K_i na profundidade de 0,10 m e uma brusca redução dos valores na profundidade de 0,30 m fora observado mesmo resultado encontrado por Peth & Horn (2006). Wossbrink, (2005) pesquisou o solo sob cultivo de floresta e encontrou um decréscimo nos valores de K_a na profundidade de 0,40 m em relação a profundidade de 0,20 m.

Observou-se uma melhoria na estrutura física do solo no tratamento com SD/SP, pois não houve nenhuma compactação promovida por forças externas, por máquinas agrícolas e o pisoteio animal. Esse resultado também foi encontrado por Nie et al. (1997), onde percebeu resultados positivos na estrutura do solo em parcelas em pousio durante o período de 8 meses no inverno, o qual apresentou melhorias na condutividade hidráulica, K_a e densidade do solo.

Na camada subsuperficial do solo os valores de σ_p praticamente se igualam, com isso foi observado um decréscimo no valor de σ_p da camada subsuperficial para a superfície no tratamento SD/SP ocorreu devido ao não pisoteio dos animais no ano de 2007, e para a SD/CP ocorreu acréscimo no valor devido ao tráfego dos animais. Esse efeito na última camada foi provocado pelo pisoteio dos animais que aplicam uma elevada pressão no solo, pois o peso deste é distribuído numa área muito pequena da superfície do solo. De acordo com Gisy et al. (1999) relataram que em solo úmido, aplicando uma pressão de 160 kPa, ocorreu compactação a profundidade de 0,12 a 0,17 m, tendo como resultado aumento da densidade e da pressão de pré consolidação, bem como também a diminuição da K_a e macroporosidade, mas não afetando a produtividade do trigo.

Os maiores valores encontrados de K_a foram no escarificado pós-pastejo 2007, entretanto ocorreu redução nesses valores de K_a no pós-pastejo outubro de 2008. Isso pode ter sido causado pela reconsolidação natural do solo, como também através do pisoteio dos animais no inverno de 2008. Um solo desestruturado é mais suscetível ao impacto provocado pelo pisoteio dos animais. Dias Junior (1994) estudou a suscetibilidade à compactação de dois solos, sob diferentes sistemas de manejo convencional e plantio direto. E concluiu que o plantio direto apresenta uma menor resistência à compactação, enquanto o preparo convencional se caracteriza pela maior suscetível à compactação.

Quanto mais próximas da saturação com água, menor foi a passagem de ar pela amostra. Vários autores encontraram que a permeabilidade ao ar é dominada pela geometria e pelo grau de saturação dos macroporos (BARDEN & PAVLAKIS, 1971; KIRBY, 1991). Ball e Schønning (2002), estudaram a relação entre a K_a e o conteúdo de água para os diferentes teores de argila. Concluíram que o solo quando seco apresenta uma alta K_a e, quando a água ocupa o espaço poroso, essa obstrução de poros prejudica K_a e ocorre um incremento do mesmo com o aumento do teor de argila.

Os maiores valores de σ_p encontrados na SD/CP podem ser atribuídos à pressão aplicada pelos animais (Tabela 7). Com a aplicação de pressões maiores do que a pressão de preconsolidação (σ_p), alterações significativas ocorreram na estrutura do solo. Esse fato pode ser explicado pelo aumento do número de contatos entre agregado com o aumento da pressão aplicada, até que os agregados se rompem e o solo adquire uma estrutura massiva (LARSON; GUPTA, 1980). Isso

pode atribuir uma vantagem de menor suscetibilidade à compactação, porém, conforme observado por (SILVA; CABEDA 2006), quando o solo está com um grau de compactação elevado, apresenta maior resistência à compressão, provocando uma condição não favorável ao desenvolvimento das plantas.

A escarificação proporcionou ao solo menor capacidade de suporte de carga. Tal comportamento corrobora com Rosa (2007), que encontrou maior suscetibilidade à compactação associada a alto índice de vazios em solo sob semeadura direta, e escarificado no mesmo tipo de solo. A escarificação é mais eficiente no aumento da macroporosidade na camada superficial do solo, decrescendo com o aumento do tempo decorrido da realização desta, sendo que sua duração nas propriedades físicas do solo e na demanda de tração compreende de três a quatro anos (ROSA et al., 2008).

Os maiores valores de IC foram encontrados no escarificado, sendo este sistema de manejo considerado suscetibilidade do solo à compactação. Sendo essa suscetibilidade pode variar em relação ao tipo de mineral presente na fração argila e também no teor de matéria orgânica (LARSON et al., 1980). Kondo; Dias Junior (1999) encontraram, para um Latossolo Roxo, valores de índice de compressão na mata natural superiores aqueles encontrados para o solo sob cultivo.

Comparando as curvas de IC e argila dos trabalhos de Imhoff et al. (2004), que trabalharam com amostras com estrutura preservada, e (LARSON et al. 1980), utilizando amostras com estrutura alterada, verificou-se que amostras com estrutura alterada são mais suscetíveis à compactação. A SD/CP pode atribuir uma vantagem sobre os demais tratamentos, pois ele apresenta uma menor suscetibilidade a compactação, porém, conforme observado por Silva; Cabeda (2006), quando o solo está com um grau de compactação elevado, apresenta maior resistência à compressão, mas essa condição não é favorável ao desenvolvimento das plantas.

3.5 Conclusão

A maior permeabilidade ao ar foi observada nos menores potenciais matriciais e na camada superficial do solo, onde há maior presença de macroporos. Obteve-se uma relação direta entre os valores de permeabilidade ao ar e o espaço aéreo do solo.

No tratamento com pisoteio animal encontrou-se maiores valores de tensão de preconsolidação na camada superficial, devido á pressão aplicada pelo tráfego dos animais.

A escarificação promoveu a desestruturação do solo, levando a diminuição da capacidade de suporte e maior suscetibilidade à compactação na camada superficial.

4 REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 12007. **Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 717-723. 2001.

ASSMANN, T.S.; JUNIOR, P. R.; MORAES, A.; ASSMANN, A.L.; KOEHLER, H.S.; SANDINI, I. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 675-683. 2003.

BALBUENA, R.H., TERMINIELLO, A.M., CLAVERIE, J.A., CASADO, J.P., MARLATS, R., 2000. Soil compaction by forestry harvester operation. Evolution of physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p.453–459.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.) **Methods of soil analysis**, Part 4, 5 ed. Madison: ASA & Soil Science Society of America, 2002, p. 1141-1158.

BASSANI, H. J. **Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1996. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Biodinâmica de Solos). 1996.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; JUNIOR, W. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p. 155-163, 2004.

BERTOL, I.; GOMES, K. E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, A.Z.; MARASCHIN, G. E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 5, p. 779-786, 1998.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p. 91-95, 2000.

BETTERIDGE, K., MACKAY, A.D., SHEPHERD, T.G., BARKER, D.J., BUDDING, P.J., DEVANTIER, B.P., COSTALL, D.A., 1999. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Science Society of America Journal**, 37, 743–760.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.; Silva, A.; Roque, C.; Ferraz, M. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, jun. 2004b.

BÖHM, W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer-Verlag, 190p. 1979.

BORU, G. et al. Responses os soybean to Oxygen deficiency and elevated root-zone Carbon Dioxide. Concetration. *Annals of botany* 91: 447-453, 2003.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.A.D.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. & KAISER, D.R. Relações entre a quantidade de palha existente sobre o solo e a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Anais. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. CD-ROM.

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**, v.29, p. 789-796, 2005b.

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

CANALLI, L.B.; ROLOFF, G. Influência do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p. 99-104, 1997.

CANNEL, R. Q. Soil aeration and compaction in relation to root growth and management. **Applied Biology**, v. 2, p. 1-86, 1977.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, Cambridge. **Proceedings...** Harvard University, Cambridge, v. 3. p. 60-64, jun. 1936.

CASSOL, L.C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário em superfície**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COLLARES, G. Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 933-942, 2008.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11 p. 1663-1674. nov. 2006.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do RS e SC**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 394 p., 2004.

CONAB. 2008. Sexto levantamento de avaliação da safra 2007/08-Março de 2008. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 13/11/08.

CORCINI, A. **Variação temporal de estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS.

CORREA, J.C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, p.107-114,1995.

DEFESA CIVIL. RS - BRIGADA MILITAR. Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: http://www2.defesacivil.rs.gov.br/estatistica/pluviometro_consulta.asp. Acesso em: 04 mai. 2009.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 23, p. 703-709,1999.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil & Tillage Research**. V.67, p. 41-64, 2002.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. Soil and environmental analysis, physical methods. New York: Marcel Dekker, p. 401-430, 2000.

DIAS Jr.,M.S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p.175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 20, p. 175-182,1996.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARD, K.; BACCHI, O.O.S. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, jan./mar., 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília - DF: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação. 412 p., 1999.

FONTANELLA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS.

FONTANELLI, R.S. et al. Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, sob plantio direto. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 84p. (Circular Técnica, 6).

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, mai./jun., 2004.

GISY, M.; FLÜHLER, H.; OTT, A. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, v.52, p.141-151, 1999.

GUIMARÃES, C. M., STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n.2, p. 213-218, mai./ago, 2002.

HATANO, R.; IWANAGA, K., OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**. Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic, 1982. 264p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HOLTZ, R.D. AND KOVACS, W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 733 pp.

HORN, R., RICHARDS, B.G., GRASLE, W., BAUMGARTL, T., WIERMANN, C., 1998. Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects-a review. *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 161, 333-346.

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.

IBGE, 2001 IBGE. Informações institucionais, produtos, notícias, pesquisas, eventos e serviços. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda> Acesso em: 30 ago. 2001.

IBGE. Censo Agropecuário 1995 – 1996. Brasília. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 15 de Agosto de 2006. 1996.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68 p.17-24, 2004.

IVERSEN, B. V. et al. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, v.2, p.618-626, 2003.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KIRBY, J. M. The influence of soil deformations on the permeability to air. **European Journal of Soil Science**. v. 42, p. 227-235, 1991.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, 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 de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

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

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.

LANZANOVA, M. E. **Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto**. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n6, p.1127-1132, 1980.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 415-423, mai./jun., 2004.

- LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.
- MARCHÃO, R.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.; JUNIOR, J.; SÁ, M.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.873-882, jun. 2007.
- MELLO IVO, W.M.P. & MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 135-143, 1999.
- MEROTTO JR, A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.
- MORAES, A.; LUSTOSA, S.B.C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPOSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, Maringá, 1997. Anais. Maringá, 1997. p.129-149.
- NIE, Z.N., MACKAY, A.D., VALENTINE, I., BARKER, D.J., HODGSON, J., 1997. Influence of pastoral fallow on plant root growth and soil physical and chemical characteristics in a hill pasture. *Plant Soil* 197, 201–208.
- NIE, Z.N.; WARD, G.N. & MICHAEL, A.T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on south – Western Victoria. *Australian J. Agric. Soil Res.*, 52:37-43, 2001.
- PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrient and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410. 2006.
- PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R. & EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red - Brown earth. *Australian J. Agric. Soil Res.*, 44:317-331, 1993.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, edição 27, Santa Maria, p. 29-48, 2003.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov-dez, 2006.
- REINERT, D. J.; ROBAINA, A. D.; REICHERT, J. M. **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, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM, 2003.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.

RICHART, A.; FILHO, J.; BRITO, O.; LANILLO, R.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. Revisão, **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.395-400, 2008.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da soja em função da compactação do solos. **Bragantia**, v.53, p.259-266, 1994.

SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; BAIER, A.C. et al. Principais forrageiras para integração lavoura-pecuária, sob plantio direto, nas Regiões Planalto e Missões do Rio Grande do Sul. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 142p.

SCAPINI, C.A.; BOENI, M.; REINERT, D.J.; RESTLE, J.; BUENO, M.B. & FONTINELLI, F. Efeito do pisoteio animal, no terceiro ano consecutivo, sobre algumas propriedades físicas do solo e produtividade do milho em solo sob plantio direto e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997. Anais. Rio de Janeiro, SBCS, 1997. 4p. CD-ROM.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade das culturas**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 108p. (Tese de doutorado).

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.

SEKER, C., ISILDAR, A.A. Effects of wheel traffic porosity and compaction of soil. *Turkish J. Agric. Forestry* v. 24, p.71–77, 2000.

SILVA, A.J.N.; 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, p.921-930, 2006.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 160 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

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. 2000a.

SILVA, V.R.da; REINERT, D.J.& REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p. 191-199, 2000 b.

SILVEIRA, P.; STONE, L.F.;; JOSÉ ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um latossolo. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 53-59, July/Sept. 2008.

SPERA, S.; SANTOS, H.; FONTANELLI, R.; TOMM, G. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v.28, p. 533-542, 2004.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS. SAS/STAT Procedure guide for personal computers. Version 5, SAS Inst. Cary, 2001.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STRECK, C. A. **Índices e fluxo de água e ar em solos do sul do Brasil**. 2008. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia –Biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS.

TOPP,G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p. 571-582, 1980.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORMENA, C.A., SILVA, A.P. da & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

TREIN, C.; COGO, N.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, p.105–111, 1991.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-898, nov. 1980.

VEIGA, M. ; REINERT, D. J. ; REICHERT, J. M. ; KAISER, D. R. . Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1437-1446, 2008.

VIEIRA, M.J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A A. L.; TORRADO, P. V.; MACHADO, J. (Coord.). Atualização em plantio direto. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 163-179.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. 2005. 107 p. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel, Germany.

ZANINE, M.; et al. Potencialidade da Integração lavoura-pecuária: relação planta-animal. **Revista Electrónica de Veterinaria REDVET**, v.2, nº 01, p. 1695-7504, jan. 2006.