



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
DEPARTAMENTO DE SOLOS – DS

**Atributos físicos do solo e produtividade da soja
após um ano de integração lavoura-pecuária em
área sob plantio direto**

Cláudio Pereira de Jesus

Dissertação apresentada à
Universidade do Estado de
Santa Catarina - Centro de
Ciências Agroveterinárias, para
obtenção do título de Mestre em
Ciência do Solo.

LAGES

Estado de Santa Catarina - Brasil

Março – 2006

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

DEPARTAMENTO DE SOLOS - DS

PROGRAMA DE MESTRADO EM AGRONOMIA

CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mestrando: CLÁUDIO PEREIRA DE JESUS – Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. ÁLVARO LUIZ MAFRA

Co-orientador: Prof. Dr. JACKSON ADRIANO ALBUQUERQUE

CAV/UDESC – LAGES

Atributos físicos do solo e produtividade da soja após um ano de integração lavoura-pecuária em área sob plantio direto

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Santa Catarina - Centro de Ciências Agroveterinárias, para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

LAGES

Estado de Santa Catarina - Brasil

Março - 2006

CLÁUDIO PEREIRA DE JESUS
Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA APÓS
UM ANO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM ÁREA SOB
PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Aprovado em:
Pela banca examinadora

Álvaro Luiz Mafra, Dr. - UDESC
Orientador

Jackson Adriano Albuquerque, Dr. -
UDESC

Jucinei José Comin, Dr. - UFSC

Homologado em:
Por

Jaime Antonio de Almeida, Dr.
Coordenador do Programa de
Mestrado em Agronomia,
Coordenador Técnico do Curso de
Mestrado em Ciência do Solo.

Paulo Cesar Cassol, Dr.
Diretor Geral do Centro de Ciências
Agroveterinárias

DEDICATÓRIAS

Aos meus pais, Eliziário Pereira de Jesus e Maria Felicidade Furtado de Jesus (*in memoriam*) que dedicaram suas vidas ao bem-estar e à educação dos filhos, meu eterno agradecimento.

À minha esposa, Margarita e aos filhos Camilla e Yuri, pela compreensão, quando de minha “ausência” nestes dois últimos anos.

AGRADECIMENTOS

- À UDESC, pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional através do curso de mestrado e ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida;
- À Fundação ABC pelo apoio e concessão da área experimental e pelo auxílio material e humano para a condução do projeto e, em especial, ao Engenheiro Agrônomo Volnei Pauletti que se mostrou sempre solidário e disponível;
- Ao Professor Orientador, Álvaro Luiz Mafra, pela sua dedicação durante o tempo do Curso, por mostra-se sempre disposto a discutir, opinar e apontar caminhos e, principalmente pela sua amizade;
- Ao Médico Veterinário, Tarcísio Nicolau Bartmeyer, pela amizade, pelo companheirismo e pela oportunidade de compartilhar a área experimental;
- A todos os professores e funcionários do Curso de Mestrado em Ciência do Solo, que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desse trabalho;
- Aos bolsistas de Iniciação Científica (UDESC/CAV) João Carlos Medeiros e Jaqueline Dalla Rosa pela sua incansável colaboração;
- Aos amigos Antônio, André Julio, Ana Elisa e Priscila pelos momentos compartilhados;
- À Maria Auta Antunes Correia dos Santos pela amizade de quase trinta anos;
- Ao meu pai, Eliziário, à minha irmã Rita e à sobrinha Ludmilla, pela acolhida e por todos os momentos que compartilhamos nestes dois anos;
- A Deus, por colocar todas essas pessoas especiais no meu caminho e por guiar os meus passos ao longo de mais esta etapa, agora vencida.

SUMÁRIO

RESUMO	vi.
ABSTRACT	viii.
LISTA DE FIGURAS	x.
LISTA DE TABELAS	xi.
1. INTRODUÇÃO	1.
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3.
2.1. Porosidade e condição estrutural do solo	6.
2.2. Estabilidade de agregados	7.
2.3. Densidade e resistência do solo à penetração	8.
2.4. Resposta das culturas às alterações físicas do solo	10.
3. MATERIAL E MÉTODOS	13.
3.1. Localização e descrição do experimento	13.
3.2. Histórico da área	14.
3.3. Manejo da cultura e dos animais	16.
3.4. Amostragem e determinações analíticas	18.
3.5. Análises estatísticas	19.
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20.
4.1. Distribuição do tamanho de poros do solo	20.
4.2. Estabilidade de agregados e grau de floculação da argila	23.
4.3. Densidade e resistência do solo ao penetrômetro	25.
4.4. Biomassa residual do trigo	31.
4.5. Produtividade de grãos de soja	32.
4.6. Produtividade animal.....	34.
5. CONCLUSÕES	35.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36.
ANEXO – Resultados dos atributos analisados	45.

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA APÓS UM ANO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM ÁREA SOB PLANTIO DIRETO¹

RESUMO

Autor: Engenheiro Agrônomo Cláudio Pereira de Jesus

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque

O uso de sistemas de preparo inadequados e pressão de pastejo acima da capacidade de suporte da pastagem e do solo estão relacionadas à degradação do solo, especialmente pela compactação. Os efeitos negativos do animal sobre o solo são uma das preocupações em relação ao manejo em sistemas de integração lavoura-pecuária. Com o objetivo de avaliar o efeito do pisoteio de bovinos de corte durante o inverno sobre atributos físicos do solo e a produtividade da soja, desenvolveu-se um estudo em Castro, PR. O solo é um Latossolo Vermelho Amarelo, argiloso, relevo suave ondulado e clima tipo Cfb. O trabalho foi desenvolvido em quatro níveis de pastejo sobre o trigo (*Triticum aestivum*), sucedido por soja (*Glycine max*), com três repetições e delineamento experimental em blocos casualizados. Os tratamentos foram: sem pastejo; 15, 30 e 45 dias de pastejo. A introdução dos animais na área ocorreu aos 50 dias após a emergência do trigo. Usaram-se novilhos com 260 kg de peso vivo médio, com lotação média de 4,0 UA/ha. O solo foi amostrado no final do ciclo do trigo, nas profundidades de 0 a 5; 5 a 10 e 10 a 20 cm para determinar a distribuição do tamanho de poros, estabilidade de agregados, grau de floculação, densidade e resistência à

penetração do solo. A intensidade de pastejo influenciou negativamente a macroporosidade, a porosidade total, a estabilidade de agregados, o grau de flocação, a densidade do solo e a resistência do solo ao penetrômetro de impacto, principalmente nos pastejos mais intensos, de 30 e 45 dias, evidenciando alterações físicas no solo em função do pisoteio animal. Essas alterações foram mais evidentes na camada de 5 a 10 cm, denotando o efeito adicional do histórico de utilização da área, sob semeadura direta. A densidade do solo foi considerada baixa para a classe textural do solo, e os valores de macroporosidade e resistência do solo à penetração mantiveram-se próximos dos limites considerados críticos, evidenciando compactação do solo estudado. A produtividade de grãos de soja não foi afetada pelo pastejo de bovinos de corte na cultura do trigo no primeiro ano de integração, possivelmente pela manutenção dos atributos físicos do solo em condições satisfatórias ao desenvolvimento vegetal.

Palavras-chave: Compactação; Estrutura do solo; *Glycine max*; Pastagem; *Triticum aestivum*.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, (46p.) – Março, 2006.

SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND SOYBEAN YIELD AFTER ONE YEAR OF A CROPPING LIVESTOCK INTEGRATION SYSTEM IN AN AREA UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT

Author: Cláudio Pereira de Jesus, M. Sc. in Agronomy

Adviser: Dr. Álvaro Luiz Mafra

Co-adviser: Dr. Jackson Adriano Albuquerque

The inadequate use of tillage systems and grazing pressure above the capacity of support of the soil and the pasture are related to the degradation of the soil, especially by compaction. The negative effects of the animal on the soil are one of the main problems in managing cropping-livestock integrated systems. With the objective of evaluating the effects of beef cattle grazing during the winter on soil physical properties and soybean yields, a study was carried out in Castro, PR, in southern Brazil. The soil is a clayey Reddish-yellow Latosol, light wavy relief, with a Cfb climate type. The experiment had four grazing levels on the wheat (*Triticum aestivum*), followed by soybean crop (*Glycine max*), with three replicates in a random block experimental design. The treatments were: without grazing; 15, 30 and 45 days of grazing. The introduction of the animals in the area happened 50 days after the wheat emergence. Steers used have a mean live mass of 260 kg, with a stocking rate of 4.0 AU (animal unit = 450 kg LM) per ha. The soil samples were collected at the end of the wheat cycle, in the layers of 0 to 5; 5 to 10 and 10 to 20 cm depth. The performed analyses were

pore size distribution, wet stability of the aggregates, flocculation degree, bulk density and resistance to penetration of the soil. The grazing intensity negatively affected soil macroporosity, total porosity, wet aggregate stability, flocculation degree, bulk density and penetration resistance, mainly under the more intense grazing treatments, 30 and 45 days, showing soil physical modifications due to animal trampling. These soil changes were more pronounced in the 5 to 10 cm depth, indicating effects of the previous use under no-tillage systems. Soil bulk density levels were considered low to this textural class, but macroporosity and resistance of the soil to the penetration were near to critical levels, showing compaction. Soybean grain yields were similar among the grazing intensity treatments at the end of first year study, possibly related to satisfactory soil physical conditions adequate to plant root development.

Keywords: Compaction; Pasture; *Glycine max*; Soil structure; *Triticum aestivum*

¹ M. Sc. Dissertation in Soil Science. Soil Science Department – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages (46pp.) – March, 2006.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Volume de chuva precipitada durante o período experimental, de junho de 2004 a abril de 2005	14.
Figura 2. Aspecto da cultura do trigo no momento da amostragem do solo, nos tratamentos testemunha (a), 15 dias de pastejo (b), 30 dias de pastejo (c) e 45 dias de pastejo (d)	15.
Figura 3. Distribuição dos tratamentos a campo no experimento em Castro – PR	16.
Figura 4. Microporosidade do solo em diferentes intensidades de pastejo na cultura do trigo. ns = não significativo (Duncan, $p = 0,05$)	22.
Figura 5. Macroporosidade do solo em diferentes intensidades de pastejo na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância pelo teste de Duncan ($p = 0,05$)	22.
Figura 6. Porosidade total do solo em diferentes intensidades de pastejo na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância pelo teste de Duncan ($p = 0,05$)	23.
Figura 7. Diâmetro médio geométrico nas diferentes intensidades de pastejo. Letras maiúsculas comparam sistemas em cada profundidade e letras minúsculas comparam profundidades em cada sistema de manejo, pelo teste de Duncan ($p = 0,05$)	26.
Figura 8. Grau de floculação da argila nas diferentes intensidades de pastejo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$)	26.
Figura 9. Densidade do solo, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$)	28.
Figura 10. Correlação entre macroporosidade e densidade do solo na área experimental	29.
Figura 11. Resistência do solo ao penetrômetro de impacto, modelo IAA-Planalsucar, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$)	30.
Figura 12. Resistência à penetração dada pelo aparelho de bolso modelo Soiltest, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$)	31.
FIGURA 13. Produtividade de grãos de soja em área de integração lavoura-pecuária, semeada em sucessão ao trigo de duplo propósito, submetido a diferentes períodos de pisoteio no ano de 2004	33.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria e características químicas do solo da área experimental em diferentes profundidades. Castro, PR, 2004	13.
Tabela 2. Atividades desenvolvidas durante o período experimental	17.
Tabela 3. Resumo da análise da variância e do teste de normalidade dos atributos físicos do solo avaliados após quatro períodos de pastejo de bovinos de corte em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso	20.
Tabela 4. Correlação de Pearson entre atributos físicos do solo	24.



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
DEPARTAMENTO DE SOLOS – DS

Atributos físicos do solo e produtividade da soja após um ano de integração lavoura-pecuária em área sob plantio direto

Cláudio Pereira de Jesus

Dissertação apresentada à
Universidade do Estado de
Santa Catarina - Centro de
Ciências Agroveterinárias, para
obtenção do título de Mestre em
Ciência do Solo.

LAGES

Estado de Santa Catarina - Brasil

Março – 2006

1. INTRODUÇÃO

A integração lavoura-pecuária tem assumido presença cada vez maior nas propriedades rurais da região Sul do Brasil. Isso se deve principalmente às baixas lucratividades que as culturas de inverno, em especial o trigo, tem proporcionado, levando o agricultor a buscar alternativas de incremento de rentabilidade nessa época do ano.

Na região dos Campos Gerais do Paraná existem muitas áreas ocupadas com forrageiras no período de inverno e primavera, em pastejo com bovinos de corte ou leite, e no verão, com culturas para produção de grãos, principalmente milho, soja e feijão. As pastagens possibilitam o suprimento de alimento para os bovinos, garantindo a produção de carne ou leite durante o inverno. Além disso, a biomassa produzida pelas forrageiras proporciona cobertura de solo para o plantio direto, que é o sistema de manejo mais utilizado na região. No entanto, os agricultores que adotam a integração o fazem de forma empírica, desconhecendo seus impactos nos atributos físicos do solo e as influências sobre as culturas, em virtude dos órgãos de pesquisa e extensão disporem de poucas informações sobre o assunto.

Do ponto de vista do solo, muitos produtores rurais são reticentes em adotar essa prática em virtude da crença de que o pisoteio animal implica inevitavelmente na compactação do solo, com prejuízos à cultura de verão. Essa preocupação é relevante, tendo em vista que essas culturas representam a maior fonte de renda da propriedade rural, e são merecedoras, portanto, de todos os cuidados para evitar queda na produtividade.

Dessa forma, o monitoramento da qualidade do solo por meio de atributos físicos é de grande importância para a manutenção e avaliação da sustentabilidade produtiva na agricultura. Neste sentido, as hipóteses formuladas foram:

- a) O pisoteio animal compacta o solo, aumenta a densidade do solo, a resistência à penetração, a estabilidade de agregados e diminui a porosidade total e macroporosidade do solo;
- b) Períodos de pisoteio mais longos, ao provocarem a compactação do solo, reduzem a produtividade de grãos de soja, cultivada após o pastejo.

Este trabalho foi desenvolvido no Centro de Difusão de Tecnologia da Fundação ABC, em Castro, Paraná e teve por principais objetivos: (a) quantificar as mudanças em atributos físicos de um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso em função de diferentes períodos de pastejo por bovinos de corte em trigo de duplo propósito (forragem/grãos); e (b) avaliar a produtividade de grãos da cultura da soja plantada em sucessão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A continuidade da agricultura é dependente do cuidado que o solo recebe, uma vez que se trata de um recurso não renovável, de cuja conservação o homem é responsável. Faz-se necessário a utilização de práticas de manejo que propiciem condições adequadas ao desenvolvimento e à produtividade das culturas.

O estudo da relação entre o uso do solo e a modificação de seus atributos é um importante instrumento na análise de produtividade e da conseqüente escolha das técnicas de manejo a serem adotadas em uma determinada área. As pastagens podem contribuir favoravelmente em termos de conservação do solo nas áreas agrícolas. As forrageiras protegem a superfície do solo e a biomassa produzida colabora na ciclagem da matéria orgânica e nutrientes na camada superficial do solo (MORAES, 1993).

Por outro lado, pastagens mal manejadas podem levar à degradação do solo, com perda de vigor, de produtividade, e da capacidade de recuperação natural das forrageiras para sustentar os níveis de produção demandados. As principais práticas de manejo que contribuem para tal degradação são o pastejo excessivo e/ou alta taxa de lotação, a falta de sistematização das áreas com declive acentuado e a compactação do solo (HODGSON, 1990).

A compactação do solo é o processo de decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, seja por máquinas agrícolas, equipamentos ou animais (LIMA, 2004). Segundo Beutler et al. (2002), a compactação reflete-se no aumento da densidade do solo, da resistência do solo à

penetração e da microporosidade, com redução da porosidade total e da macroporosidade. Startsev e McNabb (2001) acrescentam que a compactação reduz a infiltração de água, intensificando a erosão e o assoreamento dos mananciais de água.

O uso inadequado do solo em sistema de integração lavoura-pecuária pode levar ao aumento da compactação, modificar a resistência dos agregados e reduzir a taxa de infiltração de água no solo (FREGONEZI et al., 2001). Nestas áreas, a compactação do solo pode ser aumentada pelo pisoteio animal ao utilizar-se elevadas pressões de pastejo, por períodos prolongados de ocupação e pela ação de máquinas e implementos, favorecidos pela utilização da área em condições de solo úmido (PROFITTE et al., 1993).

Pesquisadores têm encontrado tanto efeitos benéficos quanto adversos ocasionados pela compactação do solo. Os efeitos benéficos têm sido atribuídos ao melhor contato solo-semente e solo-raiz, aumentando o suprimento de água e nutrientes à parte aérea da planta (KLEIN e LIBARDI, 2002; KOOISTRA et al., 1992). Por outro lado, o pisoteio animal excessivo pode ocasionar degradação do solo, ao diminuir a porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica saturada, e aumentar a densidade do solo e resistência à penetração.

Dessa forma, ao ser compactado, o solo com menos macroporos, induz à anaerobiose, diminui a disponibilidade de nutrientes e aumenta as perdas de nitrogênio para a atmosfera. Para a planta, reduz a penetração de raízes, a disponibilidade de oxigênio e leva a menor desenvolvimento vegetativo da parte aérea (GUIMARÃES et al., 2002). A restrição à penetração radical nas camadas compactadas é agravada quando o solo seca (VEEN, 1982). A compactação, ao limitar o crescimento radical das plantas, compromete sua capacidade de absorver

nutrientes e água (HAKANSSON et al., 1988; FERNANDEZ et al., 1995) e a própria fixação ao solo, provocando acamamento, sobretudo quando a camada compactada é superficial.

Outros aspectos negativos da compactação do solo são a diminuição da atividade biológica, aumento da suscetibilidade a patógenos e dificuldade no manejo da lavoura, principalmente no plantio. O aumento da proporção de poros menores devido à compactação resulta em comportamento hídrico semelhante a um solo de textura fina (GREACEN e SANDS, 1980). Isso ocorre porque o aumento na proporção de microporos induz aumento da tensão matricial, alterando a água disponível, a drenagem interna do solo e as trocas gasosas. A compactação constitui-se, assim, um elemento decisivo na degradação do solo.

As consequências da compactação se manifestam no solo e na planta. No solo, as modificações são evidenciadas pela presença de zonas endurecidas e empoçamento de água, com alterações no arranjo e volume de poros (HAKANSSON e VOORHEES, 1998).

A compactação do solo é função da classe textural, da estrutura, da umidade, bem como dos tipos e intensidades das cargas aplicadas. Quanto mais argiloso for um solo, maior a expressão das forças de coesão e adesão. A compactação relaciona-se com a umidade do solo: partindo de um solo seco, para uma mesma pressão, a densidade aumenta com o aumento da umidade do solo, atingindo um pico denominado densidade máxima, acima da qual a densidade decresce. O solo seco resiste à compactação devido à alta coesão, que aumenta a resistência à deformação. Com o aumento da umidade os filmes de água enfraquecem as ligações entre partículas, fazendo com que o solo se torne mais facilmente compactado. Se o solo estiver molhado e a água preencher os poros, a mesma é

capaz de evitar que a massa do solo se arranje, já que ela é mais deformável que os sólidos e menos deformável que os gases que preenchem os poros dos solos com baixo teor de água (HILLEL, 1998).

Nas áreas utilizadas com pecuária, os efeitos negativos do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo são influenciados pelo tipo de animal, cobertura de pastagem, taxa de lotação e duração do pastejo (DREWRY et al., 2003). Animais mais pesados, pouca cobertura vegetal, altas taxas de lotação e períodos prolongados de pastejo favorecem a compactação.

2.1. Porosidade e condição estrutural do solo

A porosidade é um dos atributos físicos mais importantes a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural do solo. A compactação, ao reduzir o volume de macroporos, diminui a aeração do solo, podendo afetar o desenvolvimento e a produtividade das plantas (HILLEL, 1998).

Além de fatores intrínsecos ao solo, como matéria orgânica, mineralogia e textura, o manejo dado ao solo pode influenciar na quantidade e distribuição do tamanho de poros (STRECK et al., 2004). O volume de macroporos é um bom indicador das condições físicas do solo, uma vez que são importantes para o crescimento de raízes (WANG et al, 1986) e para o movimento de ar e solutos (BEVEN e GERMANN, 1982). Thomasson (1978) afirma que a infiltração de água e as trocas gasosas entre atmosfera e rizosfera são reflexo do volume de macroporos. Solos com alta densidade, baixa macroporosidade e com baixa capacidade de infiltração têm baixa difusão de oxigênio podendo sua concentração cair para valores muito baixos, criando um meio extremamente redutor devido ao aumento da população anaeróbica no solo (LARCHER, 2000).

Segundo Baver et al. (1972), valores críticos de macroporosidade estão abaixo de 0,10 a 0,16 m³ m⁻³. Valores inferiores a 0,10 a 0,12 m³ m⁻³ são freqüentemente utilizados para indicar condições limitantes à sanidade das plantas e a aeração do solo. Carter (1990) observou que macroporosidade maior que 0,12 a 0,14 m³ m⁻³ são adequados para a aeração do solo e para a produção de grãos. Para Kiehl (1979), um solo em condições ideais para o desenvolvimento vegetal deve apresentar 1/3 da porosidade total formada por macroporos e os 2/3 restantes por microporos.

2.2. Estabilidade de agregados

A estrutura do solo diz respeito ao arranjo das partículas e sua organização em agregados. Próximo da superfície a estrutura é afetada pelo preparo e uso do solo e, nos horizontes mais profundos, ela é característica de cada solo. Do ponto de vista agrícola, a estrutura do solo é um dos atributos mais importantes, pois está relacionada com a disponibilidade de ar e água às raízes das plantas, suprimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração e com o desenvolvimento do sistema radical. A manutenção de um bom estado de agregação é condição primordial para garantir altas produtividades agrícolas (CORREA, 2002).

A agregação das partículas elementares do solo forma unidades estruturais compostas, separadas pelas superfícies de fraqueza, mostrando relação com os vazios ou poros do solo, bem como com a distribuição e tamanho dos mesmos ao longo do perfil ou camada aproveitada pelas plantas. A agregação aumenta o espaço poroso, reduz a densidade do solo e ajuda a manter um equilíbrio entre ar e água na rizosfera. Agregados estáveis conferem ao solo tolerância a forças externas tais como o impacto da chuva, vento e compactação.

A alteração da estrutura do solo pode ser avaliada através da determinação da estabilidade de agregados e da natureza do espaço dos poros. Ao se avaliar a agregação do solo, o mais importante é a distribuição do tamanho e a estabilidade dos agregados, sendo essa última de extrema importância na formação e preservação das boas relações estruturais dos solos (MACHADO, et al., 1996).

Uma boa distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água indica boas características físicas do solo, como elevada permeabilidade, retenção de água, arejamento, penetração de raízes e aproveitamento de nutrientes. Normalmente a macroporosidade também aumenta com a agregação do solo e com o tamanho dos agregados (PROFFITT et al., 1993).

O cultivo ou o pisoteio animal podem modificar a agregação e a estrutura do solo. A movimentação de máquinas e implementos, calagens, adubações e maior exposição do solo à ação da chuva e a ciclos de umedecimento e secagem, promovem também a redução dos agentes cimentantes, alterando a estabilidade dos agregados (FERRERO, 1991). Segundo Tisdall e Oades (1982), quanto menor o agregado, maior é sua estabilidade. Assim, a compactação do solo, ao reduzir o tamanho dos agregados, induz ao aumento de sua estabilidade estrutural, uma vez que provoca aproximação de suas partículas primárias.

2.3. Densidade e resistência do solo à penetração

A determinação da densidade do solo é um método comum para se avaliar a compactação. A densidade do solo aumenta quando os constituintes do solo ficam mais próximos uns dos outros e/ou as partículas menores ocupam os espaços vazios entre as maiores (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; SWEIGARD e BLUESTEIN, 2000).

O nível crítico da densidade do solo, acima do qual o solo é considerado compactado, ainda é um assunto controverso. Camargo e Alleoni (1997) consideraram crítico o valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos franco argilosos a argilosos. De Maria et al. (1999) constataram que acima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, em Latossolo Vermelho Escuro, ocorre restrição ao desenvolvimento de raízes, o que caracteriza um estado de compactação do solo. Canillas e Salokhe (2002), detectaram redução na produtividade de milho em $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ quando a densidade do solo aumentou de 1,53 para $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos muito argilosos. Em geral, os solos arenosos apresentam densidade crítica mais alta.

A resistência à penetração é um dos atributos físicos também utilizados na avaliação do grau de compactação do solo, estando relacionada com a facilidade com que as raízes penetram o solo. Klein e Libardi (2000), afirmam que a macroporosidade e a resistência à penetração são as propriedades que mais variam com as alterações na densidade do solo.

Entre as características do solo que influenciam a resistência à penetração estão a textura, porosidade, estrutura, umidade e densidade. Rosolem et al. (1999), observaram maior resistência à penetração em solos argilosos. A umidade do solo é inversamente relacionada à resistência à penetração, sendo esta muito baixa quando a umidade do solo encontra-se próximo à saturação (TORMENA et al., 1999). A densidade do solo apresenta uma correlação direta com a resistência à penetração (MEROTTO JR. e MUNDSTOCK, 1999).

O alongamento radical só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior que a resistência mecânica do solo à penetração (PASSIOURA, 1991). A impedância mecânica diminui a taxa de divisão celular e reduz o comprimento das células no meristema radical (BENGHOUGH e MULLINS, 1990).

Muitos trabalhos têm estabelecido faixas de resistência à penetração que seriam responsáveis por restrições ao desenvolvimento radical. Valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie. Threadgill (1982) fixa valores entre 1,5 MPa e 2,5 MPa como críticos de resistência à penetração resultando em desenvolvimento anormal e impedimento do desenvolvimento radical em árvores frutíferas. Silva et al. (2002) relatam que um valor de 2,0 MPa de resistência à penetração do solo tem sido associado a condições impeditivas para o crescimento das raízes e consequentemente da parte aérea das plantas. Entre 2,0 e 1,0 MPa, a restrição ao desenvolvimento radical decresce aproximadamente linearmente. Abaixo de 1,0 MPa, assume-se que a restrição radical é pequena, muito embora Beutler e Centurion (2004a) determinaram redução na densidade radical e na produtividade de grãos de soja a partir da resistência à penetração de 0,85 MPa. Da mesma forma, Dexter (1987) verificou que em baixos conteúdos de água no solo, valores de resistência à penetração de 1,0 MPa podem restringir o crescimento radical e que em solos mais úmidos pode haver crescimento radical em valores de resistência à penetração superiores a 4,0 MPa.

2.4. Resposta das culturas às alterações físicas do solo

A produtividade agrícola é dependente da interação de fatores da planta, clima, competição com parasitas, patógenos e inços. O desenvolvimento da parte aérea da planta é altamente dependente de um abundante sistema radical, capaz de explorar um volume suficiente de solo e absorver água e nutrientes. Os fatores do solo que afetam o desenvolvimento radical podem ser divididos em fatores químicos, como nutrientes e elementos tóxicos, e fatores físicos, como resistência mecânica à penetração, disponibilidade hídrica e aeração.

Em sistemas de pastejo, a intensidade do pisoteio e ou o tempo de permanência dos animais na área também determinam o grau de degradação estrutural que pode ocorrer ao solo (LIMA, 2004). Leão (2002), considera que a lotação animal excessiva sem ajustes para uma adequada capacidade de suporte é um dos agentes aceleradores do processo de degradação do solo, alterando as condições para o crescimento do sistema radical. A extensão e a natureza desses efeitos são determinadas pela taxa de pisoteio, pelo tipo de solo, e principalmente pela umidade do solo. O pastejo realizado em condições elevadas de umidade maximiza a degradação física do solo, prejudicando o crescimento de plantas (BETTERIDGE et al., 1999).

TORRES et al. (2004) relatam que a compactação reduz as trocas gasosas, a concentração do oxigênio na atmosfera edáfica e cria um ambiente redutor relacionado com a morte de plântulas de soja e menor estande da cultura.

Correa e Reichardt (1995), trabalhando em um Latossolo na Amazônia Central, sob condições de floresta primária e pastagens formadas com *Brachiaria humidicola*, com diversos anos de uso, observaram maior compactação e impedimento mecânico à penetração das raízes na camada de 0-10 cm nos solos sob pastagem.

Lustosa (1998) não observou diferenças significativas na produtividade de soja e milho em experimento conduzido por um período de três anos, de integração lavoura-pecuária em Guarapuava, Paraná. Silva et al. (2000), também estudando a integração lavoura-pecuária, não observaram diferenças significativas na produtividade de milho para grãos e para silagem, em experimento conduzido por três anos consecutivos. Junior (2005) não observou aumento da densidade em área

de integração lavoura-pecuária, nem diferenças na produtividade de soja, cultivada em seqüência à consorciação aveia-azevém pastejada por bovinos de leite.

Para Bennie (1996), é difícil generalizar conclusões, pois a influência da compactação do solo sobre o crescimento radical é decorrente de diversos fatores, que dependem das características genéticas das plantas, condições ambientais e do estádio de desenvolvimento da cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição do experimento

O experimento foi implantado em Castro, Paraná, em uma área de 12 hectares no mês de junho de 2004, num Latossolo Vermelho Amarelo, argiloso (EMBRAPA, 1999), representativo da região centro sul do estado, com altitude de 1.005 m e coordenadas 24°47'28" Sul e 50°00'25" Oeste. A granulometria e as características químicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria e características químicas do solo da área experimental em diferentes camadas. Castro, PR, 2004.

Prof. ¹	Granulometria			pH			P	K	Ca	Mg	Al
	Areia	Silte	Argila	C _{org.}	Água	CaCl ₂					
cm										— cmol _c dm ⁻³ —	
0-5	343	218	439	58	5,7	5,0	5,9	29	27	7,6	5,0
5-10	285	223	492	39	5,6	4,9	5,8	12	21	5,4	3,3
10-20	283	195	522	35	5,6	4,9	5,8	9	20	5,3	2,8

(1) Média de 24 amostras por profundidade. Metodologia Tedesco et al. (1995).

O clima da região é subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e ocorrência de geadas freqüentes e severas no inverno; Cfb segundo classificação de Köppen. A média das temperaturas dos meses mais quentes é inferior a 22°C e as dos meses mais frios é inferior a 18°C e a temperatura média anual está entre 17°C

e 18ºC. A precipitação média anual está entre 1600 e 1700 mm. As condições climáticas vigentes durante o período experimental encontram-se na Figura 1.

Os tratamentos consistiram de quatro intensidades de pastejo animal em trigo (*Triticum aestivum* L.) de duplo propósito (forragem e grãos), a saber: sem pastejo; 15 dias de pastejo; 30 dias de pastejo e 45 dias de pastejo (Figuras 2a, 2b, 2c e 2d). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições (Figura 3). As parcelas experimentais tinham cerca de 1,0 ha cada uma e foram separadas com cerca elétrica.

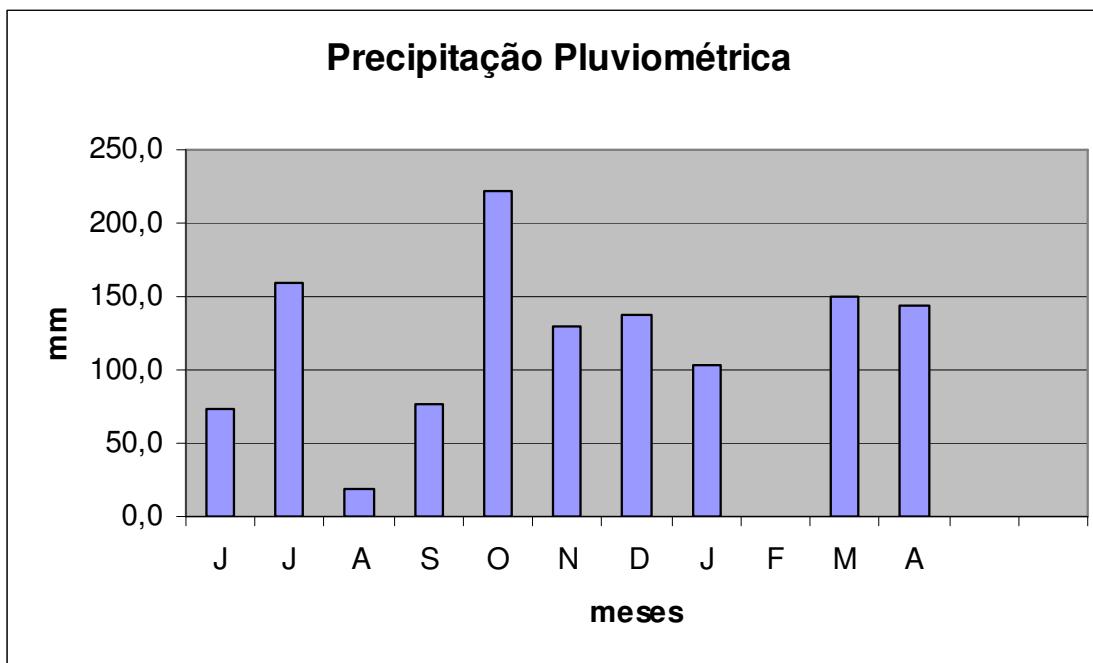


Figura 1. Volume de chuva precipitada durante o período experimental, de junho de 2004 a abril de 2005.

3.2. Histórico da área

A área experimental vinha sendo cultivada no sistema de semeadura direta há seis anos. O sistema de rotação de culturas utilizado no verão é o de soja por

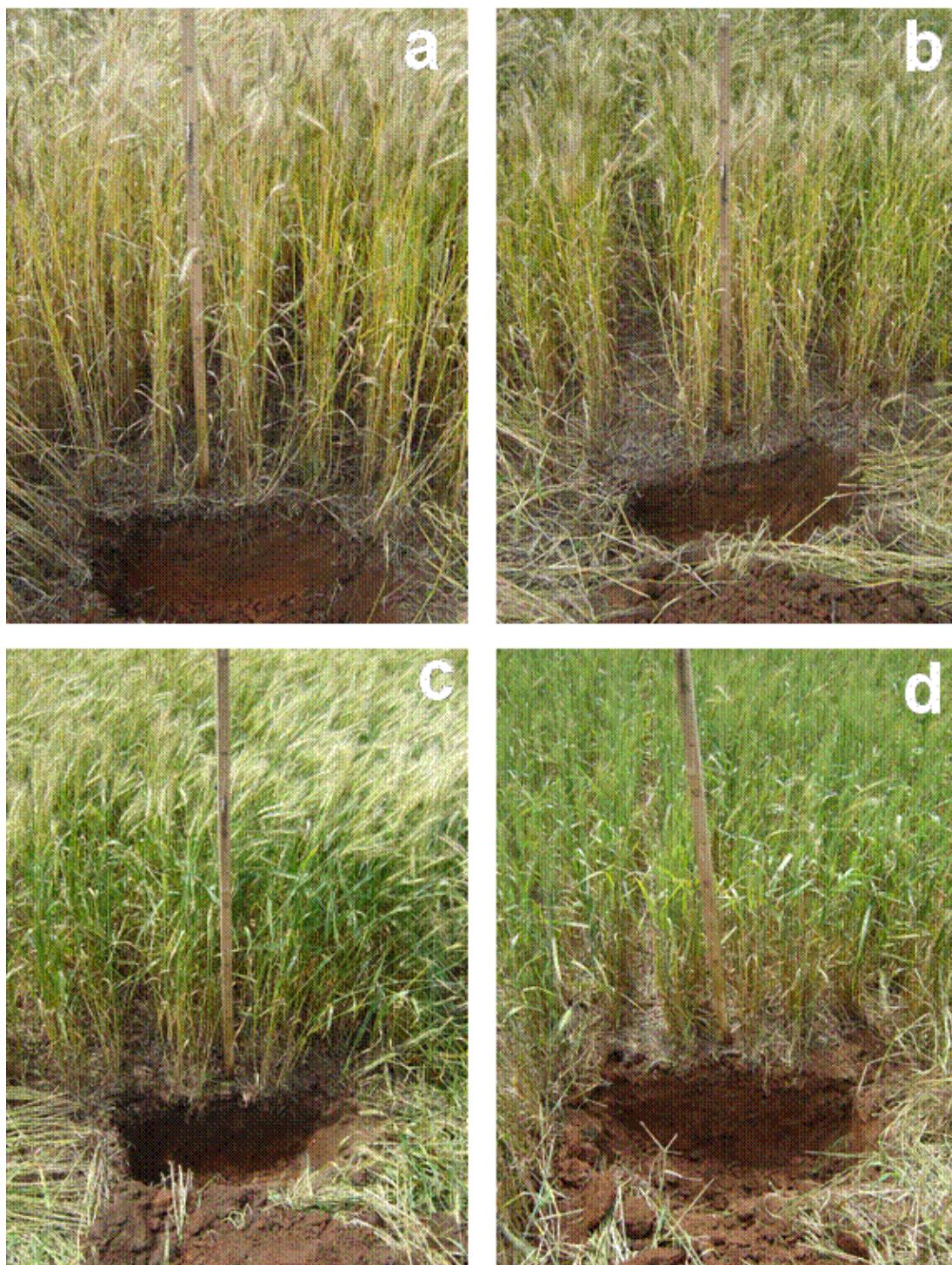


Figura 2. Aspecto da cultura do trigo no momento da amostragem do solo nos tratamentos testemunha (a), 15 dias de pastejo (b), 30 dias de pastejo (c) e 45 dias de pastejo (d).

dois anos consecutivos e milho por um ano. Durante o inverno a área é cultivada com azevém (*Lolium multiflorum*) e aveia (*Avena strigosa*), tanto para a produção de palha para a o sistema de semeadura direta como para a produção de silagem pré-secada. No verão anterior ao experimento a área foi ocupada com a cultura da soja.

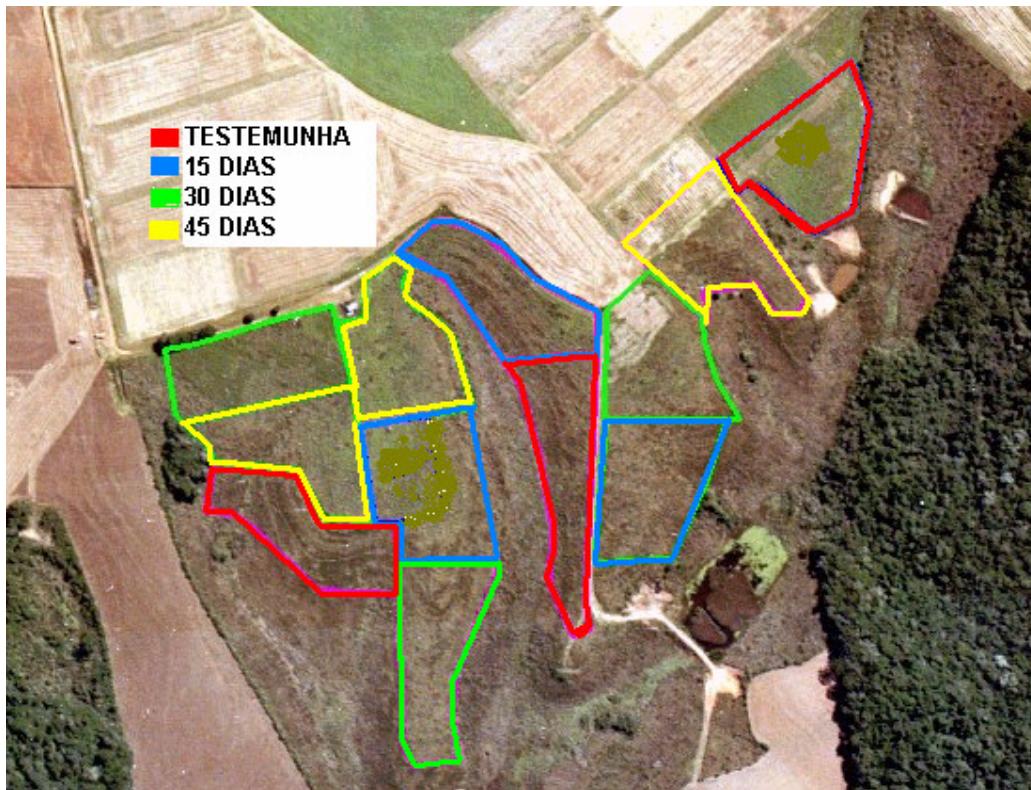


Figura 3. Distribuição dos tratamentos a campo no experimento em Castro, PR.

3.3. Manejo da cultura e dos animais

A cultura de trigo, cultivar BRS-176, de ciclo médio, foi semeada em junho de 2004 no sistema de semeadura direta, com espaçamento de 0,17 m entre linhas e densidade de 330 plantas m^{-2} , colhida em início de novembro de 2004 (Tabela 2). A adubação de base foi realizada com 250 kg ha^{-1} de NPK 17-30-00, e a adubação de cobertura com 300 kg ha^{-1} da fórmula 21-00-22, aos 30 dias após a emergência. Ao final do período de pastejo foi feita a avaliação da massa seca do trigo. Após a colheita do trigo, procedeu-se à semeadura da soja (*Glycine max L.*).

Tabela 2. Atividades desenvolvidas durante o período experimental.

Etapa	Época
Amostragem do solo para análise química	Abril/2004
Semeadura do trigo	Junho/2004
Introdução dos animais na área experimental	Julho/2004
Retirada dos animais do pastejo de 15 e 30 dias	Agosto/2004
Retirada dos animais do pastejo de 45 dias	Setembro/2004
Amostragens do solo para análises químicas e físicas	Outubro/2004
Colheita do trigo	Novembro/2004
Semeadura da soja	Novembro/2004
Amostragem para avaliação do rendimento de soja	Março/2005
Colheita da soja	Abril/2005

A cultivar de soja utilizada foi a Codetec-206, de ciclo precoce, semeada em 30 de novembro de 2004 no sistema de semeadura direta, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e 350.000 plantas ha⁻¹. Antes da semeadura procedeu-se à inoculação das sementes com rizóbio específico. A adubação de base foi realizada com 250 kg ha⁻¹ da fórmula 00-26-26. Os controles de plantas espontâneas, pragas e doenças nas culturas de trigo e soja foram feitos conforme as recomendações técnicas seguidas na região.

Os animais utilizados no experimento foram bovinos de corte desmamados com peso médio de 260 kg e idade média de 10 meses, introduzidos na área experimental aos cinqüenta dias após a emergência do trigo. O método de pastejo foi o contínuo, mantendo-se uma oferta fixa de matéria-seca por animal de 10% de seu peso vivo, com taxa de lotação de aproximadamente 4,0 UA ha⁻¹.

3.4. Amostragens e determinações analíticas

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2004, durante o estádio de grão farináceo do trigo, nas profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm, em quatro pontos eqüidistantes distribuídos em cada parcela experimental. Os atributos físicos avaliados foram densidade do solo e de partículas, microporosidade, macroporosidade e porosidade total, grau de floculação, analisados segundo a metodologia relatada pela Embrapa (1997); estabilidade de agregados (KEMPER e CHEPIL, 1965) e resistência à penetração (STOLF et al, 1983). A composição química do solo em cada parcela, em amostras coletadas nos mesmos pontos de amostragem, foi analisada segundo Tedesco et al. (1995).

A densidade do solo foi avaliada pelo método do anel volumétrico e a densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. A microporosidade foi obtida pela utilização da mesa de tensão com areia, sob sucção de 0,006 MPa. A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e de partículas. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e a microporosidade. A distribuição do tamanho de partículas do solo foi determinada pelo método do densímetro de Bouyoucus, utilizando NaOH como dispersante para obtenção do teor de argila total, e água para determinação da argila dispersa. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do grau de floculação.

Para a determinação da estabilidade de agregados, foram separados e pesados agregados compreendidos entre 8,35 e 4,76 mm, com umidade corrigida. As amostras foram previamente imersas em água, com posterior agitação vertical e peneiramento com um jogo de quatro peneiras sobrepostas (4,76; 2,00; 1,00 e 0,25 mm). Após a tamisação, os agregados de cada classe, retidos nas peneiras, foram

secos e pesados, obtendo-se a massa de agregados estáveis para cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG).

A resistência do solo foi medida com penetrômetro de impacto e de bolso. As leituras com penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar (STOLF et al, 1983), foram feitas em dois pontos opostos aos locais de coleta dos anéis volumétricos, totalizando oito amostras em cada parcela. Os cálculos da resistência foram realizados segundo Stolf (1991). As leituras com penetrômetro de bolso modelo Soiltest, com escala de zero a 5 kg cm⁻², foram executadas em cinco pontos na parede da trincheira onde foram coletadas as demais amostras, totalizando 20 determinações por camada em cada parcela. A umidade do solo foi determinada por gravimetria nas mesmas camadas.

As amostragens para a estimativa da produtividade de grãos de soja foram realizadas em maio de 2005, em amostras de 4,0 m², quando os grãos apresentavam umidade em torno de 20%. Posteriormente os grãos foram secados, pesados e os valores corrigidos para umidade de 13%.

3.5. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilkinson. A análise de variância foi realizada pelo teste F, para comparação das médias foi utilizado o teste de Duncan ao nível de significância de 0,05. As relações entre os atributos físicos do solo e destes com a composição química do solo foram avaliadas por correlação de Pearson. Para resistência do solo à penetração foi ainda realizada análise de regressão múltipla, buscando relacionar sua dependência à umidade e densidade do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de pastejo na cultura do trigo modificou ($p<0,05$) a densidade do solo, macroporosidade, porosidade total, grau de floculação e a resistência ao penetrômetro avaliada com equipamento de impacto (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise da variância e do teste de normalidade dos atributos físicos do solo avaliados após quatro períodos de pastejo de bovinos de corte em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso.

	Variáveis							
	Mi	Ma	PT	DMG	GF	DS	RPI	RPb
Trat	0,21	0,03	0,02	0,15	0,01	0,02	0,05	0,74
Prof	0,18	0,12	0,15	<0,01	0,52	<0,01	<0,01	<0,01
Bloco	0,04	0,82	0,17	0,67	0,08	0,12	0,07	0,82
Trat*Prof	0,69	0,99	0,80	<0,01	0,51	0,83	0,24	0,85
CV (%)	7	18	5	9	23	16	17	16
W:normal	0,96	0,94	0,95	0,98	0,97	0,92	0,87	0,98

Trat = tratamento; **Prof** = profundidade; **Mi** = microporosidade; **Ma** = macroporosidade; **PT** = porosidade total; **DMG** = diâmetro médio geométrico dos agregados; **GF** = grau de floculação; **DS** = densidade do solo; **RPI** = resistência ao penetrômetro de impacto; **RPb** = resistência ao penetrômetro de bolso.

4.1. Distribuição do tamanho de poros do solo

Em termos de distribuição de poros, verificou-se que a microporosidade variou de $0,42$ a $0,48\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$, sem influência dos tratamentos e das profundidades de amostragem (Figura 4).

A microporosidade está relacionada com o armazenamento de água no solo, influenciando o desenvolvimento das plantas especialmente nas épocas

críticas de suprimento hídrico (VEIGA, 2005). Ao contrário do que afirma Beutler et al. (2002), a microporosidade apresentou correlação negativa com a densidade do solo (Tabela 4).

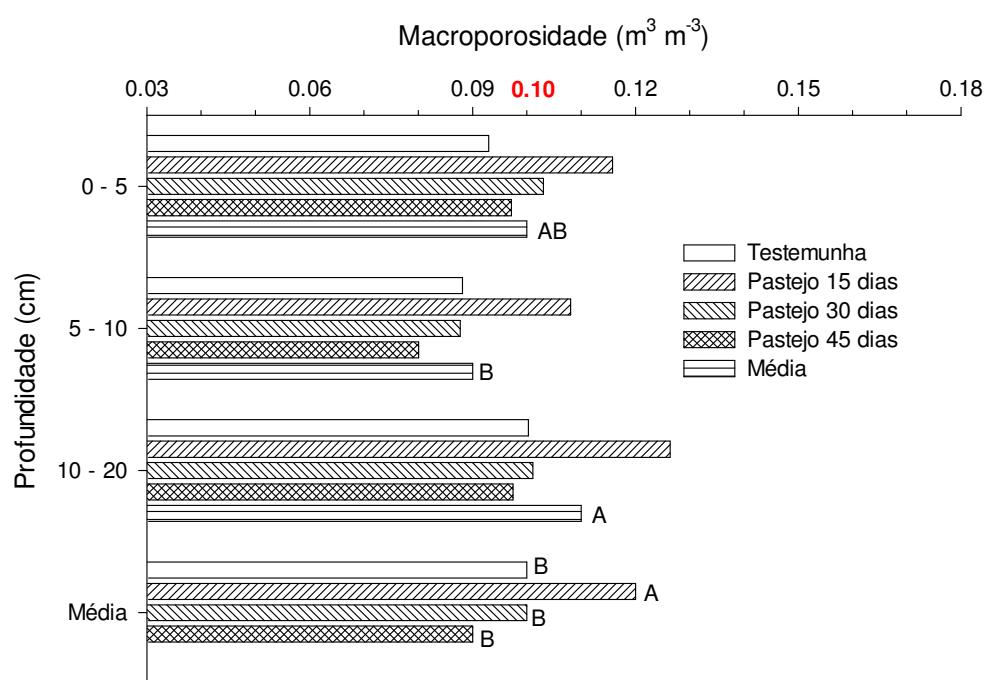
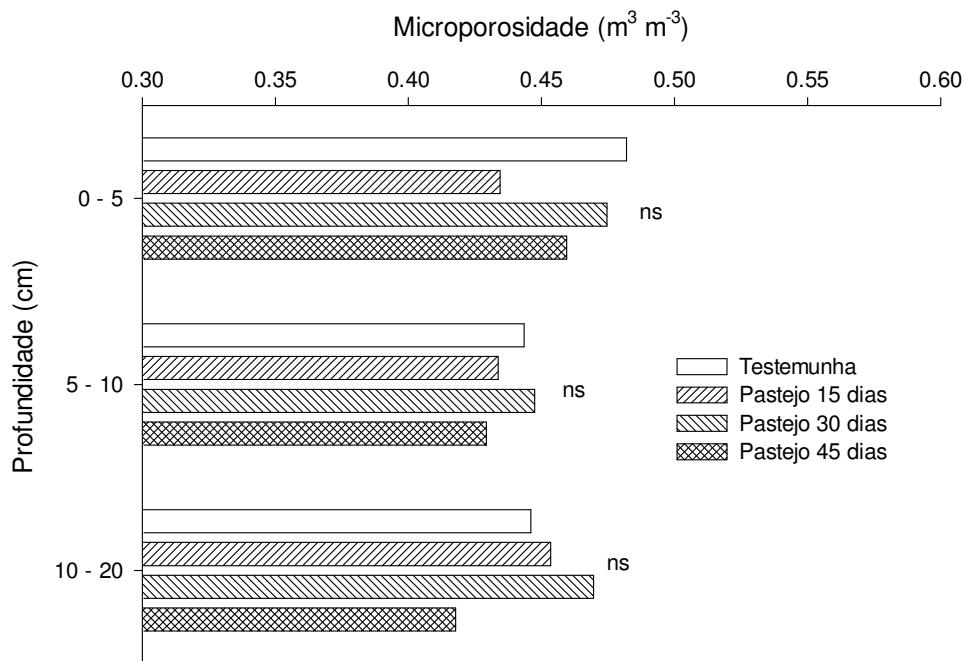
A macroporosidade do solo foi maior no solo sob 15 dias de pastejo, com $0,12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ na média das profundidades em relação aos demais tratamentos (entre $0,09$ e $0,10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$). Entre as camadas, o menor valor médio foi obtido na camada de 5-10 cm ($0,09\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$), diferindo da camada de 10-20 cm ($0,11\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$), na média dos tratamentos (Figura 5).

Considerando que os macroporos são a rota primária para o movimento da água no solo, a redução dos mesmos pode restringir a transmissão da água e nutrientes até a zona radical. Em todos os tratamentos, inclusive no maior período de pastejo, a macroporosidade esteve próxima de $0,10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$, nível considerado crítico para as trocas gasosas (REYNOLDS et al., 2002).

A redução da macroporosidade de 22% em relação à camada subjacente e a elevada relação microporosidade/macroporosidade (4 a 5) são indicativos de compactação na camada de 5-10 cm, o que se deve ao histórico da área (6 anos sob plantio direto) e ao efeito adicional do pisoteio.

A porosidade total variou de $0,49$ a $0,56\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$, e foi menor na média das profundidades na maior intensidade de pastejo, com $0,50\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ (Figura 6). Não houve variação entre as profundidades analisadas.

Trein et al. (1991) verificaram diminuição da macroporosidade e aumento na densidade do solo na camada superficial devido ao pisoteio dos animais. Posteriormente, verificou-se que o pastejo contínuo no inverno, sobre pastagem de aveia e azevém, compactou do solo pelo pisoteio animal num Argissolo Acinzentado de textura média, quando comparado à área não pastejada (SCAPINI et al., 1996).



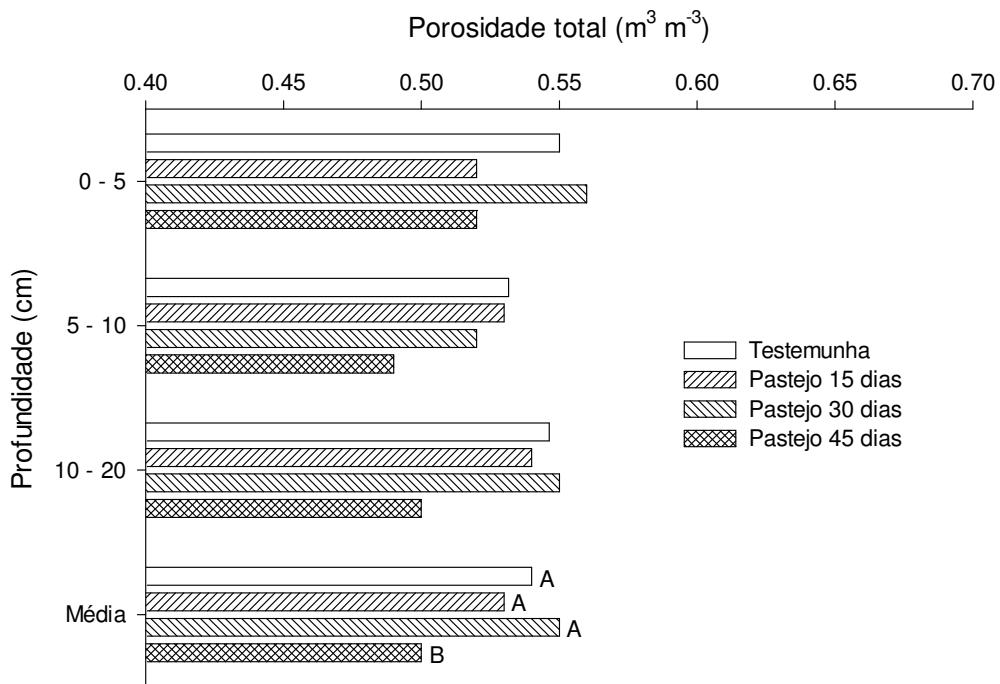


Figura 6. Porosidade total do solo em diferentes intensidades de pastejo na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância pelo teste de Duncan ($p = 0,05$).

4.2. Estabilidade de agregados e grau de floculação da argila

O diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados variou de 1,2 a 1,8 mm (Figura 7), mostrando interação significativa entre sistemas de manejo e profundidade de amostragem (Tabela 3). Bertol e Santos (1995) não constataram diferença comparando o diâmetro médio ponderado (DMP) na camada superficial de um Cambissolo Húmico utilizado com lavoura e pastagem, em relação à condição de mata nativa, reflorestamento e campo nativo.

Entre as diferentes intensidades de pastejo não houve um comportamento uniforme entre as diferentes profundidades de amostragem, sugerindo que a estabilidade de agregados não sofreu influência dos tratamentos no período estudado, e não houve correlação entre ela e os demais atributos físicos do solo (Tabela 4).

Tabela 4. Correlação de Pearson entre atributos físicos do solo.

	Ma	PT	DMG	GF	DS	RPI	RPb
Mi	- 0,14 ns	0,27 ns	0,03 ns	0,03 ns	- 0,33 *	- 0,22 ns	- 0,06 ns
Ma		0,54 **	- 0,14 ns	0,01 ns	- 0,51 **	- 0,04 ns	0,13 ns
PT			- 0,01 ns	- 0,19 ns	- 0,91 **	- 0,15 ns	- 0,11 ns
DMG				- 0,04 ns	0,06 ns	- 0,18 ns	- 0,08 ns
GF					0,26 ns	0,06 ns	0,18 ns
DS						0,38 *	0,19 ns
RPI							0,55 **

Mi = microporosidade; **Ma** = macroporosidade; **PT** = porosidade total; **DMG** = diâmetro médio geométrico dos agregados; **GF** = grau de floculação; **DS** = densidade do solo; **RPI** = resistência ao penetrômetro de impacto; **RPb** = resistência ao penetrômetro de bolso; **ns** = não significativo; * = significativo ($0,01 < \alpha < 0,05$); ** = significativo ($\alpha < 0,01$)

O diâmetro médio geométrico dos agregados foi menor na camada de 10 a 20 cm de profundidade, na média dos tratamentos, em relação às camadas superiores.

Normalmente as espécies forrageiras contribuem na agregação do solo. Num estudo desenvolvido por Stone e Buttery (1989) com nove forrageiras, incluindo gramíneas e leguminosas, semeadas em vasos, verificou-se que, aos 80 dias após a germinação, as espécies diferiram na habilidade de melhorar a estabilidade dos agregados, influenciada principalmente pela massa de raízes das plantas. Dessa forma, sistemas agropastoris, envolvendo espécies de diferentes tipos de sistema radicular, podem melhorar significativamente a agregação do solo. Nesse aspecto destaca-se a importância da rotação de culturas, incluindo a cultura do milho que deixa elevada quantidade de biomassa no solo.

Raízes de gramíneas perenes, quando comparadas a outras espécies agrícolas, normalmente aumentam a estabilidade de agregados, o que se deve à alta densidade de raízes, às periódicas renovações do sistema radicular e à

uniforme distribuição dos exsudatos no solo que estimulam a atividade microbiana (SILVA e MIELNICZUK, 1997).

O grau de floculação da argila (GF) variou de 22 a 40%, sendo maior no tratamento testemunha em relação às intensidades de 30 e 45 dias de pastejo (Figura 8). Isso pode ter sido influenciado pelo maior aporte de matéria orgânica no tratamento testemunha, que pode afetar o balanço de cargas elétricas do solo. Não houve variação deste atributo entre as profundidades analisadas. A baixa floculação desse solo pode ser devida à aplicação freqüente de calcário que, ao elevar o pH, reduz os níveis de Al, o qual é um cátion floculante.

O grau de floculação é calculado pela relação entre argila natural e total, sendo um indicativo do estado de floculação ou dispersão dos colóides. Baixos valores de floculação relacionam-se com maior quantidade de argila dispersa, o que favorece sua mobilidade no solo. Isto pode ocasionar obstrução dos poros e redução na infiltração (AZEVEDO e BONUMA, 2003).

4.3. Densidade e resistência do solo ao penetrômetro

A densidade do solo variou de 1,02 a 1,24 Mg m⁻³ entre as diferentes intensidades de pastejo analisadas, passando, na média das profundidades, de 1,11 Mg m⁻³ no tratamento testemunha para 1,20 Mg m⁻³ no solo com 45 dias de pastejo (Figura 9). Os pastejos com intensidade intermediária não diferiram do tratamento testemunha sem a presença dos animais. Resultados semelhantes foram obtidos por Cassol (2003), que avaliou as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, submetido a diferentes alturas de manejo da pastagem.

Normalmente as maiores modificações físicas no solo advindas do pisoteio animal são evidenciadas na camada superficial do solo, e são mais evidentes

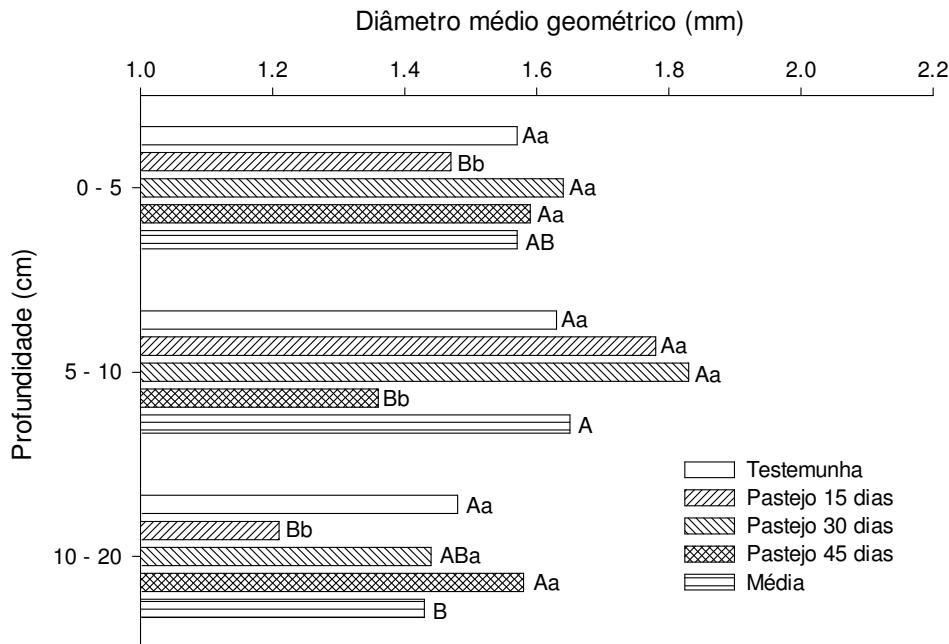


Figura 7. Diâmetro médio geométrico nas diferentes intensidades de pastejo. Letras maiúsculas comparam sistemas em cada profundidade e letras minúsculas comparam profundidades em cada sistema de manejo, pelo teste de Duncan ($p = 0,05$).

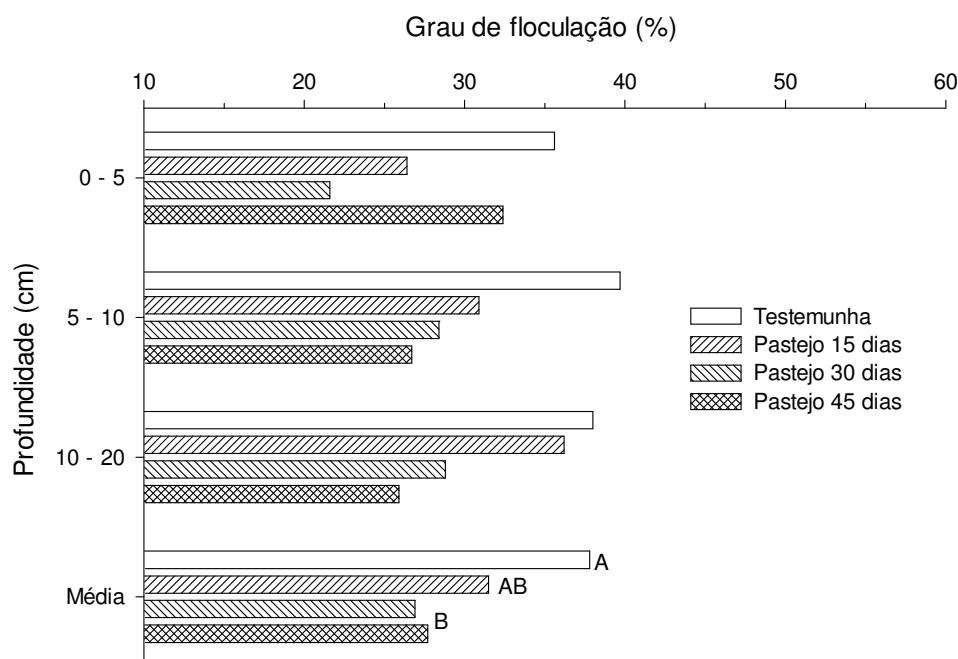


Figura 8. Grau de floculação da argila nas diferentes intensidades de pastejo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$).

quando a oferta de forragem da pastagem é mantida baixa, conforme constatado por Bertol et al. (1998), em campos naturais de Eldorado do Sul, RS e em pastagem de capim elefante anão da região de Ituporanga, SC (BERTOL et al., 2000). Entre as profundidades analisadas, a densidade do solo foi maior na camada de 5 a 10 cm em relação às demais. Isso provavelmente se deve ao pisoteio animal e ao histórico de uso anterior da área, sob semeadura direta.

O pisoteio animal pode ocasionar no solo, principalmente o aumento da densidade, alteração na estabilidade dos agregados, influenciando taxa de infiltração de água no solo (FREGONEZI et al., 2001). As variações entre as intensidades de pastejo e entre as profundidades de amostragem podem ser relacionadas com o período de ocupação da área pelos animais, a carga animal adotada, o histórico de uso e mecanização do solo, e a umidade do solo no período. Neste sentido, durante o período avaliado, a precipitação pluviométrica atingiu cerca de 550 mm, concentrados nos meses de julho e outubro de 2004, com totais de cerca de 160 e 220 mm, respectivamente (Figura 1).

As modificações físicas no solo advindas do uso com pastagens dependem de fatores como: tipo e lotação animal, sistema de manejo da pastagem, oferta de forragem, do tipo de solo e da condição de umidade do solo no período de pastejo (CANTARUTTI, et al., 2001; MELLO, 2003). Boeni et al. (1995), ao comparar o efeito do pisoteio de animais em pastejo contínuo por um período de quatro meses sobre pastagem consorciada de aveia e azevém, em um solo franco siltoso no Rio Grande do Sul, não observaram alterações significativas na camada de 0 a 10 cm. Silva et al. (2000), também não observaram variações na densidade do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo textura franca, em função do pastejo dos animais.

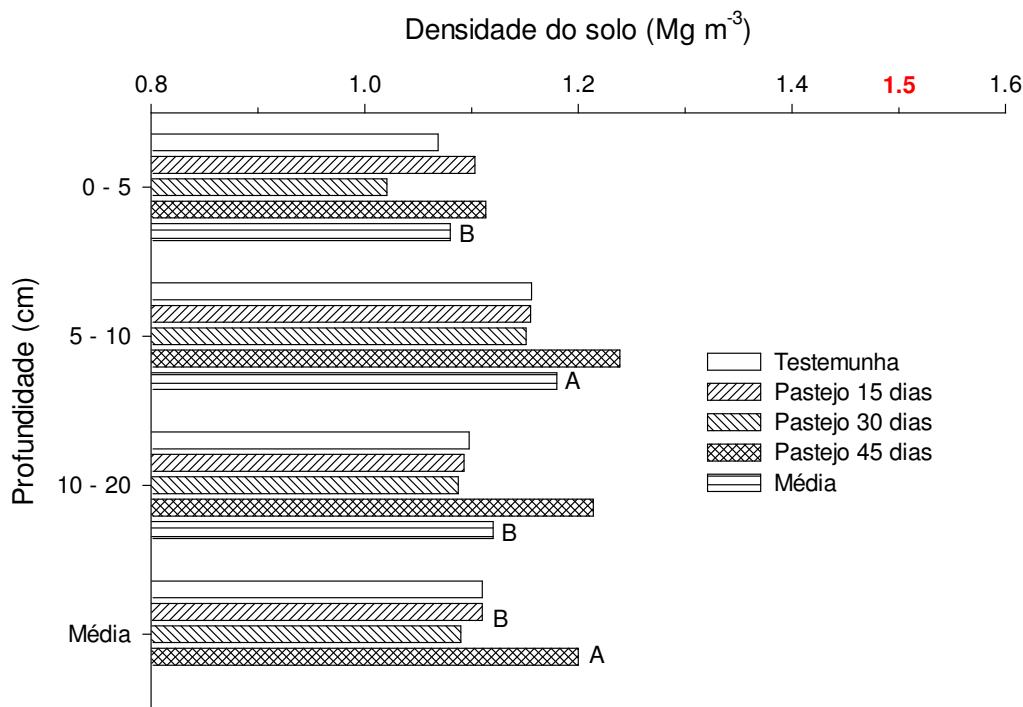


Figura 9. Densidade do solo, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$).

Salienta-se que a densidade do solo está abaixo dos níveis considerados críticos para o crescimento radical e o desenvolvimento das culturas, que varia entre 1,4 a 1,6 Mg m^{-3} para solos argilosos (REICHERT et al., 2003). Outra forma de se indicar a densidade crítica pode ser feita com base na correlação entre densidade do solo e macroporosidade, a qual no presente estudo foi negativa (Figura 10). Neste caso, adotando-se o limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para macroporosidade (REYNOLDS et al., 2002), o valor limitante de densidade do solo seria em torno de $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$, o que já estaria sendo alcançado neste solo, principalmente na camada de 5 a 10 cm de profundidade e na média do tratamento com 45 dias de pastejo (Figura 9).

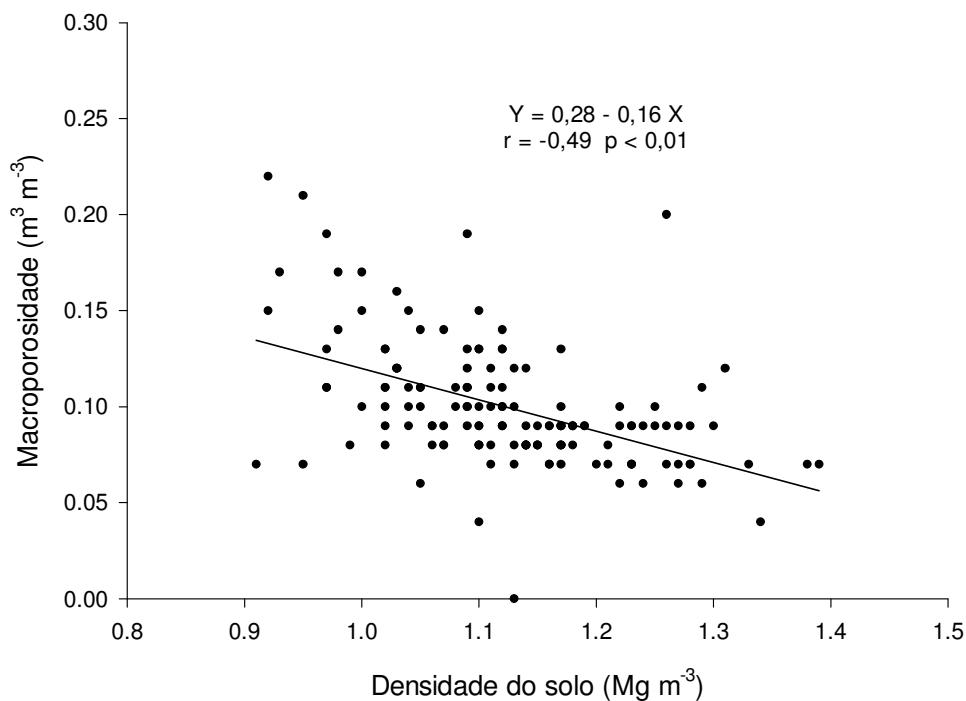


Figura 10. Correlação entre macroporosidade e densidade do solo na área experimental.

A resistência do solo à penetração (RP) integra os efeitos da densidade e da umidade nas condições físicas do solo necessárias para o crescimento das raízes. Através do penetrômetro de impacto pode-se observar que a resistência na média das profundidades analisadas foram maiores nas intensidades de pastejo de 30 e 45 dias em relação ao testemunha (Figura 11). A resistência do solo ao penetrômetro de impacto aumentou em profundidade.

À semelhança do penetrômetro de impacto, o equipamento de bolso apresentou valores crescentes da camada superficial para as subjacentes (Figura 12). Entretanto, neste caso, não houve diferença entre os tratamentos.

Os valores de resistência à penetração, especialmente em subsuperfície, estão acima do valor crítico de 2,0 MPa (BENGHOUGH e MULLINS, 1990) indicados para o equipamento de impacto, e de 2,0 $kg cm^{-2}$, no caso do aparelho de bolso.

Ressalta-se que a resistência à penetração normalmente aumenta com o incremento da densidade e redução da umidade do solo, apresentando variabilidade espacial e temporal por influência das condições de manejo dado ao solo (SILVA et al., 2004). Nas condições estudadas, somente a resistência medida com equipamento de impacto mostrou correlação positiva com a densidade do solo (Tabela 4). A resistência à penetração não se correlacionou com a umidade do solo no momento da coleta tanto no equipamento de bolso ($r = -0,25$; $p = 0,12$), quanto no de impacto ($r = -0,23$; $p = 0,17$).

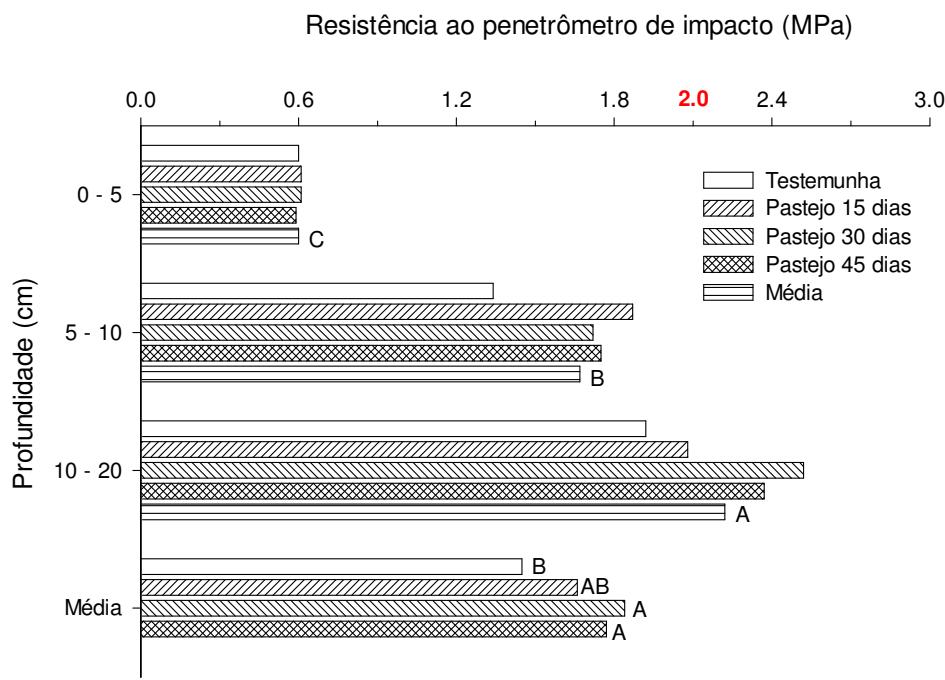


Figura 11. Resistência do solo ao penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$).

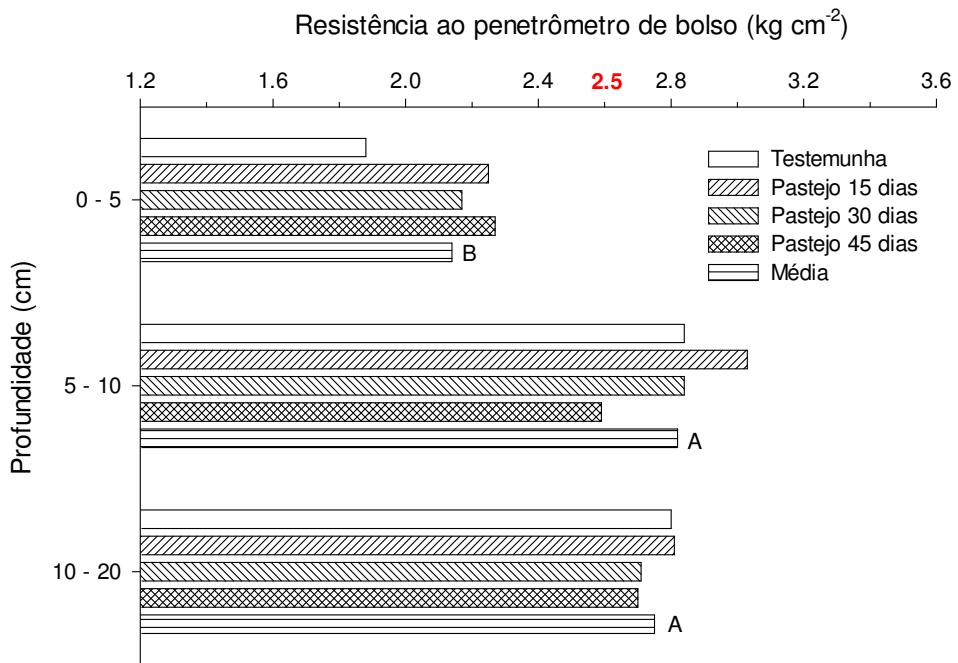


Figura 12. Resistência à penetração medida pelo aparelho de bolso modelo Soiltest, sob diferentes intensidades de pastejo animal na cultura do trigo. Letras diferentes entre médias indicam significância (Duncan, $p = 0,05$).

4.4. Biomassa residual do trigo

Os resíduos da parte aérea do trigo presentes no final do ciclo da cultura, antes da semeadura da soja decresceram de 6.127 kg ha^{-1} de massa seca no tratamento testemunha, para 3.186 kg ha^{-1} com 45 dias de pastejo (BARTMEYER, dados não publicados). Tais diferenças podem ter influenciado os atributos físicos avaliados.

Excetuando o testemunha, os demais tratamentos tiveram médias de matéria seca inferiores a 6.000 kg ha^{-1} que, segundo Alvarenga et al. (2001), seria o aporte anual de palha necessário para a manutenção do sistema de semeadura direta. No entanto, como o sistema é de integração, parte substancial da exigência de palha é suprida pela cultura de verão sucessora. É importante incluir no plano de

rotação de culturas espécies que deixam elevadas quantidades de resíduos para a manutenção do aporte de matéria seca, como o milho, por exemplo.

4.5. Produtividade de grãos de soja

Embora existam diferenças significativas na densidade do solo entre os períodos de pastejo, e a resistência à penetração tenha ultrapassado o nível considerado crítico de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998), a produtividade final, corrigida para 13% de umidade não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, pelo teste de Duncan ($p<0,05$), variando entre 3.610 a 3.792 kg ha⁻¹ (Figura 13). Em função disso pode-se afirmar que o pisoteio ocasionado pela integração lavoura-pecuária não interferiu na produtividade da soja. Tais resultados corroboram os obtidos por Johnson et al. (1990) que não encontraram decréscimo na produtividade de grãos de soja em área afetada pela compactação superficial do solo. Queiroz Voltan et al. (2000) também não observaram efeito da compactação do solo sobre a produtividade da soja.

Os resultados obtidos divergem, porém, dos encontrados por Beutler e Centurion (2004b), que em experimento com arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho de textura média constataram redução na produtividade com resistência à penetração a partir de 1,82 MPa. Já na cultura da soja, Beutler e Centurion (2004a) observaram redução na produtividade de grãos a partir de resistência à penetração de 0,85 MPa, que provocou decréscimo de 18% na densidade de raiz.

A ausência de diferença na produtividade entre os níveis de pisoteio pode ser explicada, em parte, pelo fato da cultura da soja ter experimentado menores valores de resistência à penetração em função de maior precipitação pluviométrica após a data de amostragem do solo (Figura 1). Outro fator a ser considerado,

conforme Moraes et al. (2000) e Broch (2000), é o efeito regenerador dos eventuais efeitos negativos na porosidade, na densidade do solo e na resistência à penetração exercido pela cultura anual através da ação do sistema radical. Consalter (1998), em experimento conduzido em Guarapuava, PR, mostrou que os efeitos negativos do pisoteio podem ser rapidamente revertidos após o cultivo da cultura de verão, representada no caso pelo milho.

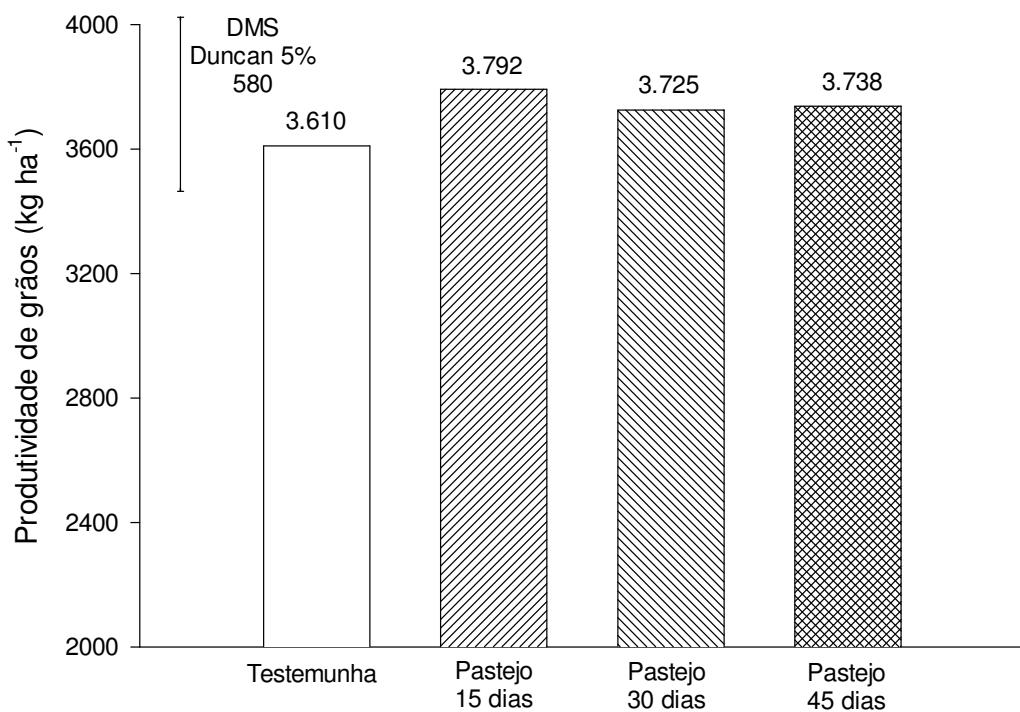


Figura 13. Produtividade de grãos de soja em área de integração lavoura-pecuária, semeada em sucessão ao trigo de duplo propósito, submetido a diferentes períodos de pisoteio no ano de 2004.

Albuquerque et al. (2001), estudando o efeito da integração lavoura-pecuária em um Nitossolo, observaram alterações nas características da planta, bem como na produtividade do milho em área de semeadura direta, submetida ao pastejo de aveia no período de inverno. Oliveira et al. (2000) e Macedo (2001), apontaram que, em sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, o rendimento de culturas

anuais após a pastagem tendia a ser maior que na ausência da rotação com pastagem.

Leite et al. (2004) comparando a produção de soja na integração lavoura-pecuária em sistema de plantio direto com diferentes alturas de manejo da pastagem de inverno e área sem pastejo, verificaram que o efeito do pisoteio animal sob qualquer altura de pastejo não implicou em alterações no rendimento da cultura, obtendo produtividade acima de $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Em outro trabalho de integração lavoura-pecuária, Spera et al. (2004) não observaram redução nos rendimentos de soja e milho antecedidos pelo pastejo de gramíneas de estação fria.

Os resultados contraditórios obtidos em diferentes trabalhos reforçam os relatos de Bennie (1996), sobre a dificuldade de se generalizar conclusões quanto ao desenvolvimento de plantas em solos compactados.

4.6. Produtividade animal

De acordo com Bartmeyer (dados não publicados), a produtividade animal, expressa pelo ganho de peso vivo por unidade de área, foi maior com o aumento do período de pastejo. O ganho de peso vivo médio diário nos tratamentos de 15, 30 e 45 dias de pastejo foi de $1,46 \text{ kg dia}^{-1}$; $1,65 \text{ kg dia}^{-1}$ e $1,69 \text{ kg dia}^{-1}$, respectivamente. O ganho de peso vivo em kg ha^{-1} foi de 181 kg ha^{-1} ; 351 kg ha^{-1} e 458 kg ha^{-1} , respectivamente.

5. CONCLUSÕES

A integração lavoura-pecuária, nas condições em que foi conduzida, reduziu a macroporosidade, a porosidade total, o grau de floculação, e aumentou a densidade do solo, a estabilidade de agregados e a resistência do solo ao penetrômetro de impacto. Tais modificações foram mais evidentes nos pastejos mais intensos, de 30 e 45 dias, evidenciando alterações físicas no solo em função do pisoteio animal. Essas alterações foram mais evidentes na camada de 5 a 10 cm, denotando o efeito adicional do histórico de utilização da área, sob semeadura direta.

A densidade do solo foi considerada baixa para a classe textural do solo, e os valores de macroporosidade e resistência do solo à penetração mantiveram-se próximos dos limites considerados críticos, evidenciando compactação do solo estudado;

A produtividade de grãos de soja não foi afetada pelo pastejo de bovinos de corte na cultura do trigo no primeiro ano de integração, possivelmente pela manutenção dos atributos físicos do solo em condições satisfatórias ao desenvolvimento vegetal;

Avaliações de médio a longo prazos são necessárias face às mudanças dinâmicas na qualidade física do solo impostas pelo pisoteio animal e pelo manejo das culturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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**. v. 25, p. 717-723, 2001.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W.A.L.; CRUZ, J.C., SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema de plantio direto. **Informe Agropecuário**, v.22, p.25-36, 2001.
- AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, p. 609-617, 2003.
- BAVER, L. D.; FARWOETH; R. B.; Soil structure, effects in the growth of sugar beets. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.5, p.45-48, 1972.
- BENGHOUGH, A. G., MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p.341-358, 1990.
- BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plant Roots**. New York: M. Dekker, p.453-470, 1996.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A.; ALMEIDA, E.X.; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1047-1054, 2000.
- BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, L.A.Z.; MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.779-786, 1998.
- BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, p. 263-267, 1995.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinanométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.191-199, 2002.

BEUTLER, A. N., CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.6, p.581-588, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1793-1800, 2004b.

BETTERIDGE, K.; MACKAY, A. D.; SHEPHERD, T. G.; BARKER, D. J.; BUDDING, P. J.; DEVANTIER, B. P.; COSTALL, D. A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.37, p.743-760, 1999.

BEVEN, K. J.; GERMAN, R. F. Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research**, v.18, p.1311-1325, 1982.

BOENI, M.; BASSANI, H. J.; REINERT, D. J.; SCAPILI, C.; RESTLE, J. Efeito do pisoteio animal durante o pastejo de inverno sobre algumas propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995. Viçosa. **Resumos expandidos...** Viçosa: UFV, 1995. v.1, p.160-161.

BROCH, D. L. Integração agricultura-pecuária no Centro-Oeste do Brasil. In: ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 4, 2000, Uberlândia. **Plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Uberlândia: UFU, 2000. p.53-60.

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

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v.65, p.221-230, 2002.

CANTARUTTI, R. B.; NASCIMENTO JR., D.; COSTA, O. V. Impacto do animal sobre o solo: compactação e reciclagem de nutrientes. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38, 2001. **Resumos...** Piracicaba: ESALQ/SBZ, 2001. CD-ROM.

CARTER, M. R. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity and cultivated loamy sand to loam soils. **Soil and Tillage Research**, v. 15, p. 257-268, 1990.

CASSOL, L.C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 144p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

CORREA, J. C. Efeito de sistemas de cultivos na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.203-209, 2002.

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

CONSALTER, M. A. S. **Sistema integrado lavoura pecuária e compactação em Latossolo Bruno**. Dissertação de Mestrado. UFPR-Curitiba, 1998. 105p. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

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

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v.98, p.303-312, 1987.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.175-182, 1996.

DREWRY, J. J.; LITTLEJOHN, R. J.; SINGLETON, R. M.; MONAGHAM, R. M. ; SMITH, R. C. Dairy pasture responses to soil physical properties. **Australian Journal of Soil Research**. v. 42, p. 99-105, 2003.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2º ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

- FERNANDEZ, E. M.; CRUSCIOL, C. A. C.; THIMOTEO, C. M. de S.; ROsolem, C. A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, v.23, p.117-132, 1995.
- FERRERO, A. F. Effect of compaction simulating cattle trampling on soil physical characteristics in woodland. **Soil and Tillage Research**, v.19, p.319-329, 1991.
- FREGONEZI, G.A.F.; BROSSARD, M.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C. Modificações morfológicas e físicas de um Latossolo argiloso sob pastagens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.1017-1027, 2001.
- GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**. v.18, p.163-189, 1980.
- GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.213-218, 2002.
- HAKANSSON; I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. **Methods for assessment for soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p.167-179.
- HAKANSSON; I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, v.11, p.239-282, 1988.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego, Academy Press, 769p., 1998.
- HODGSON, J. G. **Grazing management: science into practice**. Hong Kong: Longman Scientific and Technical, 1990. 203p.
- JOHNSON, J. F.; VOORHEES, W. B.; NELSON, W. W.; RANDALL, G. W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, v. 82, p. 973-979, 1990.
- JUNIOR, L. A. S. Alterações de características do solo na implantação de um sistema de integração agricultura-pecuária leiteira. **Dissertação de Mestrado em Agronomia**. UFPR-Curitiba. 2005.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. **Size distribution of aggregates.** In: BLACK, C. A. Ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society Agronomy, p.495-509, 1965.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**, São Paulo, Ceres, 1979, 215p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, v.30, p.959-964, 2000.

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

KOOISTRA, M. J. et al. Root soil-contact of maize, as measured by a thin-section technique. Effects of soil compaction. **Plant and soil**, v.139, p.119-129, 1992.

LARCHER, W. A planta sob estresse. In: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Editora Rima, 2000. p.341-437.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem.** Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002, 58 p.

LEITE, J. G. D. B.; FLORES, J. P. C.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em um sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26, 2004, Lages. **Anais...** Lages: SBCS/UDESC, 2004. CD-ROM.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de pós-graduação em Agronomia. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004, 60p.

LUSTOSA, S. B. C. **Efeito do pastejo nas propriedades químicas do solo e no rendimento de soja e milho em rotação com pastagem consorciada de inverno no sistema de plantio direto.** Curitiba, 1998. 84p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo), UFPR-Curitiba. 1998.

- MACEDO, C. M. C. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 18. Piracicaba, 2001. **Anais**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2001. p.257-283.
- MACHADO, R. L. T.; TURATTI, A. L.; MACHADO, A. L. T.; ALONÇO, A. S. REIS, A. V. Estudos de parâmetros físicos em solo de várzea, antes e após escarificação. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.2, p. 175-178, 1996.
- MELLO, L.M.M. Integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais**... Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.
- MEROTTO JR., A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.
- MORAES, A. Pastagens como fator de recuperação de áreas degradadas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGENS, 2., 1993. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. p.191-215.
- MORAES, A.; SANDINI, I.; ALVES, S.J.; PELISSARI, A. Sistemas de produção: Integração lavoura pecuária no 3º planalto do Paraná. In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO FORRAGEIRAS DO CONE SUL, Zona Campos, 18. Guarapuava: CPAF/APA. Dinâmica da vegetação em ecossistemas pastoris. **Anais**... p.6-22, 2000.
- OLIVEIRA, E.; MEDEIROS, G. B.; OLIVEIRA, J. C.; SÁ, J. P. G.; COLOZZI, F. A.; KRANZ, W. M.; SILVA JR, N. F.; ABRAHÃO, J. J. F.; GUERINI, V. L.; MARTIN, G. L. **Recuperação de pastagens no noroeste do Paraná**: bases para o plantio direto e integração lavoura e pecuária. Londrina, IAPAR, 2000. 96p. (Informe de Pesquisa, 134).
- PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research**, v.29, p.717-728, 1991.
- 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 Journal Agricultural of Soil Research**, v.44, p.317-331, 1993.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, n.27, p. 29-48, 2003.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p. 131-146, 2002.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.34, p.821-828, 1999.

SCAPINI, C.A.; BOENI, M.; REINERT, D.J.; RESTLE, J.; BUENO, M.B.; FONTINELLI, F. Efeitos do pisoteio animal, no terceiro ano consecutivo, sobre plantio direto e convencional In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13. Águas de Lindóia, **Anais**. (CD-ROM), SLACS, 1996. 4p.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 21, p. 313-319, 1997.

SILVA, V. R., REICHERT, J. M., REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 399-406, 2004.

SILVA, V. R.; 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**, v.24, p.191-199, 2000.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H. MÜLLER, M. M. L; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo**: métodos de estudo –sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: Funep, 2002, p.1-18.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. 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**, v. 28, p. 533-542, 2004.

- STARTSEV, A. D.; MCNABB, D. H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameters of boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal.** v. 65, p. 224-231, 2001.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 15, p. 229-235, 1991.
- STOLF, R.; FERNANDES, J., FURLANI NETO, V. L. **Recomendações para o uso de penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf.** São Paulo, MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983.
- STONE, J. A.; BUTTERY, B. R. Nine forages and the aggregation of a clay loam soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 69, p. 165-169, 1989.
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 755-760, 2004.
- SWEIGARD, R. J.; BLUESTEIN, P. **Use of field measurements to predict reforestation success.** University of Kentuchi, p.129-141, 2000.
- TEDESCO, M. J., GIANELLO, C., BISSANI, C. A., BOHNEN, H., VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** 2 ed. Porto Alegre: UFRGS. 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.
- THREADGILL, E. D. Residual tillage effects as determined by cone index. **Transactions of ASAE**, v.25, p.859-863, 1982.
- TISDALL, J. M., OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**. v.33, p.141-163, 1982.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v.52, p.223-232, 1999.
- TORRES, E.; ALMEIDA, A. M. R.; SARAIVA, O. F.; HENNING, A. A.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.; FERREIRA, L.P. Morte de plântulas de soja provocada pelo excesso de umidade e falta de aeração do solo. Londrina: **Embrapa Soja**, 2004. 31p.
- TREIN, C.R.; COGO, N.P.; 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**, v. 15, p. 105-111, 1991.
- VEEN, B. W. The influence of mechanical impedance on the growth of maize roots. **Plant and Soil**, v.66, p.101-109, 1982.
- VEIGA, M. Propriedades de um Nitossolo Vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas. 2005. 110p. **Tese (Doutorado em Ciência do Solo)** – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- WANG, J; HESKETH, J. D.; WOOLEY, J. T. Preexisting channels and soybean rooting patterns. **Soil Science**, v. 141, p.432-437, 1986.

ANEXO – Resultados dos atributos avaliados

Trat	Prof	Blo	Prod	Mi	Ma	PT	DMG	GF	DS	RPi	RPb	UG
			cm	kg ha ⁻¹	m ³ m ⁻³		mm	%	Mg m ⁻³	MPa	kg cm ⁻²	kg kg ⁻¹
T0	0-5	1	3.605	0,459	0,104	0,549	1,6	45	1,11	0,6	1,3	0,43
T0	0-5	2	3.505	0,495	0,105	0,555	1,6	34	1,05	0,6	2,3	0,41
T0	0-5	3	3.721	0,492	0,070	0,537	1,5	27	1,04	0,6	2,1	0,43
T0	5-10	1	3.605	0,402	0,093	0,541	1,7	46	1,14	1,2	2,1	0,34
T0	5-10	2	3.505	0,478	0,085	0,526	1,7	37	1,18	1,5	3,2	0,36
T0	5-10	3	3.721	0,450	0,087	0,529	1,5	35	1,15	1,3	3,1	0,36
T0	10-20	1	3.605	0,409	0,096	0,561	1,6	35	1,12	1,9	2,5	0,35
T0	10-20	2	3.505	0,480	0,100	0,540	1,5	37	1,10	2,3	3,1	0,40
T0	10-20	3	3.721	0,449	0,105	0,549	1,3	43	1,07	1,5	2,8	0,38
T15	0-5	1	3.855	0,443	0,092	0,492	1,4	31	1,14	0,6	2,4	0,32
T15	0-5	2	3.600	0,402	0,134	0,527	1,5	25	1,12	0,6	2,0	0,34
T15	0-5	3	3.922	0,459	0,121	0,550	1,5	23	1,05	0,6	2,4	0,39
T15	5-10	1	3.855	0,416	0,120	0,565	1,8	27	1,08	2,1	2,8	0,33
T15	5-10	2	3.600	0,439	0,083	0,468	1,7	40	1,29	2,1	2,9	0,36
T15	5-10	3	3.922	0,446	0,121	0,552	1,9	26	1,10	1,3	3,4	0,38
T15	10-20	1	3.855	0,413	0,124	0,556	1,0	29	1,05	2,4	2,5	0,41
T15	10-20	2	3.600	0,507	0,096	0,493	1,4	47	1,22	2,4	2,8	0,37
T15	10-20	3	3.922	0,440	0,159	0,579	1,2	33	1,01	1,5	3,1	0,41
T30	0-5	1	3.770	0,439	0,132	0,558	1,7	35	1,01	0,7	2,8	0,38
T30	0-5	2	3.874	0,463	0,092	0,560	1,6	15	1,00	0,6	2,0	0,39
T30	0-5	3	3.532	0,522	0,086	0,558	1,7	15	1,06	0,6	1,8	0,44
T30	5-10	1	3.770	0,438	0,093	0,504	1,7	38	1,17	2,0	3,3	0,34
T30	5-10	2	3.874	0,409	0,078	0,517	1,7	16	1,14	1,6	2,6	0,31
T30	5-10	3	3.532	0,495	0,093	0,525	2,1	31	1,15	1,5	2,6	0,39
T30	10-20	1	3.770	0,458	0,093	0,510	1,4	41	1,16	2,4	2,9	0,37
T30	10-20	2	3.874	0,439	0,112	0,558	1,6	19	1,06	2,7	2,4	0,38
T30	10-20	3	3.532	0,512	0,098	0,594	1,3	27	1,03	2,5	2,8	0,48
T45	0-5	1	3.209	0,431	0,077	0,467	1,5	36	1,24	0,6	2,3	0,35
T45	0-5	2	3.861	0,491	0,110	0,551	1,5	28	1,03	0,6	2,7	0,38
T45	0-5	3	4.144	0,457	0,105	0,539	1,9	33	1,08	0,6	1,8	0,42
T45	5-10	1	3.209	0,413	0,090	0,476	1,4	27	1,30	2,1	2,6	0,31
T45	5-10	2	3.861	0,474	0,080	0,500	1,2	25	1,19	1,5	2,7	0,31
T45	5-10	3	4.144	0,401	0,070	0,493	1,5	28	1,22	1,6	2,4	0,35
T45	10-20	1	3.209	0,424	0,103	0,470	1,6	29	1,30	2,1	2,6	0,33
T45	10-20	2	3.861	0,438	0,093	0,522	1,5	22	1,16	2,5	2,5	0,31
T45	10-20	3	4.144	0,392	0,097	0,510	1,6	26	1,18	2,5	3,0	0,33

Trat = tratamento (**T0** = testemunha; **T15** = 15 dias de pastejo; **T30** = 30 dias de pastejo; **T45** = 45 dias de pastejo); **Prof** = profundidade; **Blo** = bloco; **Prod** = produtividade de grãos; **Mi** = microporosidade; **Ma** = macroporosidade; **PT** = porosidade total; **DMG** = diâmetro médio geométrico dos agregados; **GF** = grau de flocação; **DS** = densidade do solo; **R_{Pi}** = resistência ao penetrômetro de impacto; **R_{Pb}** = resistência ao penetrômetro de bolso; **UG** = umidade gravimétrica.

Continuação

Trat	Prof	Blo	C_{org.}	pHa	pHs	SMP	P	K	Ca	Mg	Al
		cm	g kg ⁻¹				— mg dm ⁻³ —	— cmol _c dm ⁻³ —			
T0	0-5	1	47,971	6,200	5,450	6,300	55,325	13,275	7,425	4,365	0,125
T0	0-5	2	52,881	5,855	5,625	6,075	17,575	19,600	9,325	5,830	0,450
T0	0-5	3	66,931	5,550	4,900	5,625	30,350	25,125	9,100	6,090	0,100
T0	5-10	1	33,914	5,920	5,175	5,975	41,400	6,500	6,625	3,480	0,250
T0	5-10	2	33,430	5,450	5,150	5,925	5,350	9,225	6,275	3,613	0,800
T0	5-10	3	40,859	5,467	4,667	5,633	5,450	16,825	5,600	3,515	0,900
T0	10-20	1	26,982	5,867	5,275	6,300	23,175	5,250	6,775	3,470	0,250
T0	10-20	2	29,296	5,600	5,133	5,900	5,625	12,950	5,325	2,820	0,850
T0	10-20	3	38,229	5,450	4,700	5,675	6,450	18,775	5,025	3,225	0,950
T15	0-5	1	42,299	5,740	4,967	5,800	18,575	31,025	7,575	4,995	0,450
T15	0-5	2	54,309	5,668	5,025	6,075	24,967	16,575	5,275	2,770	0,100
T15	0-5	3	64,794	5,725	5,000	5,875	36,050	33,350	8,750	5,555	0,175
T15	5-10	1	38,745	5,877	5,025	5,833	7,400	31,575	6,450	4,365	0,350
T15	5-10	2	27,912	5,600	4,800	5,925	5,400	4,875	1,100	1,310	0,550
T15	5-10	3	42,145	5,650	4,875	5,775	13,825	30,400	5,050	3,483	0,450
T15	10-20	1	32,688	5,815	4,575	5,800	5,450	28,933	5,625	3,648	0,775
T15	10-20	2	28,318	5,647	4,733	5,933	4,600	4,650	0,650	1,133	0,775
T15	10-20	3	35,393	5,675	4,950	5,700	8,375	29,900	4,100	3,025	0,450
T30	0-5	1	55,710	5,425	4,433	5,650	24,900	28,450	4,900	3,145	0,225
T30	0-5	2	51,852	6,115	5,350	6,150	31,125	40,250	8,650	5,993	0,400
T30	0-5	3	69,237	5,567	4,600	5,633	15,575	24,625	8,450	5,388	0,225
T30	5-10	1	49,039	5,523	4,825	5,775	9,700	11,450	2,750	1,938	0,550
T30	5-10	2	41,641	6,007	5,100	5,933	13,500	34,825	6,725	5,110	0,325
T30	5-10	3	43,652	5,320	4,700	5,450	8,733	21,400	5,533	3,417	0,633
T30	10-20	1	35,287	5,375	4,575	5,575	4,700	11,025	1,425	1,310	0,950
T30	10-20	2	37,976	5,945	5,433	6,050	7,350	28,050	9,067	4,210	0,350
T30	10-20	3	39,570	5,375	4,400	5,600	6,000	18,225	4,850	2,850	0,900
T45	0-5	1	53,776	5,590	4,725	5,825	14,100	24,375	4,050	3,063	0,225
T45	0-5	2	64,136	5,800	5,375	6,000	57,050	42,950	7,650	5,973	0,175
T45	0-5	3	68,078	5,600	4,900	5,850	25,800	30,075	9,600	6,318	0,150
T45	5-10	1	31,888	5,350	4,625	5,525	10,175	11,725	1,700	1,520	0,850
T45	5-10	2	42,142	6,010	5,300	6,050	16,900	35,775	5,700	4,390	0,175
T45	5-10	3	47,654	5,325	4,650	5,575	9,300	22,825	6,675	4,085	0,625
T45	10-20	1	34,969	5,225	4,600	5,600	5,625	8,850	1,125	1,130	1,025
T45	10-20	2	42,067	5,813	5,300	6,025	9,000	32,175	4,150	3,253	0,200
T45	10-20	3	43,013	5,425	4,800	5,550	24,400	22,375	6,575	3,795	0,825

Trat = tratamento (**T0** = testemunha; **T15** = 15 dias de pastejo; **T30** = 30 dias de pastejo; **T45** = 45 dias de pastejo); **Prof** = profundidade; **Blo** = bloco; **C_{org.}** = carbono orgânico total; **pHa** = pH em água; **pHs** = pH em CaCl₂; **SMP** = índice SMP; **P** = fósforo extraível Mehlich 1; **K** = potássio trocável Mehlich 1; **Ca** = cálcio trocável; **Mg** = magnésio trocável; **Al** = alumínio trocável.