

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MOBILIZAÇÃO, ATRIBUTOS DE SOLO E VARIABILIDADE
ESPACIAL EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Osmar Conte
(Tese de Doutorado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**Mobilização, atributos de solo e variabilidade espacial em
integração lavoura-pecuária**

OSMAR CONTE

Engenheiro-Agrônomo (UFRGS)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil

Março de 2011

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

C761m Conte, Osmar
 Mobilização, atributos de solo e variabilidade espacial
 em integração lavoura-pecuária / Osmar Conte — Porto
 Alegre : O. Conte, 2011.

 xvi, 136 f.; il.

 Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em
 Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade
 Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

 1. Solo : atributos do solo 2. Compactação do solo 3.
 Semeadura direta 4. Integração lavoura-pecuária I. Título.

 CDD: 631.4

OSMAR CONTE
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

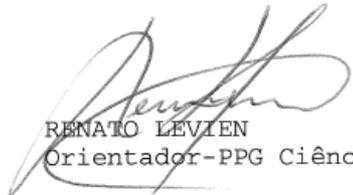
TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

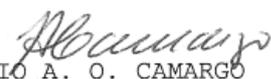
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 21.03.2011
Pela Banca Examinadora

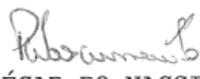


RENATO LEVIEN
Orientador-PPG Ciência do Solo

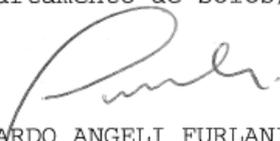
Homologado em: 16.05.2011
Por



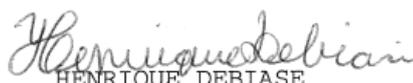
FLÁVIO A. O. CAMARGO
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo



PAULO CÉSAR DO NASCIMENTO
Departamento de Solos/UFRGS



EDUARDO ANGELI FURLANI
UNESP



HENRIQUE DEBIASE
EMBRAPA



PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por assim traçar meu caminho;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, à Faculdade de Agronomia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do doutorado;

Ao professor e orientador Renato Levien, agradeço por todos os conhecimentos e ensinamentos, pela dedicação na realização dos trabalhos e pela amizade;

Ao professor Ibanor Anghinoni pela co-orientação, ensinamentos, profissionalismo, conselhos e amizade;

A todos os professores do PPG em Ciência do Solo que contribuíram para a minha formação no Doutorado;

Ao CNPq e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus pais, Claudino e Amábile e meus irmãos, Evandro e Sirlei, que sempre estiveram juntos na minha jornada;

Aos colegas, eternos amigos, companheiros de trabalho e de tantas discussões e confraternizações, de forma especial ao Michael, Sérgio, João Paulo, Marquel, Jonatan, Joice, Diane, Sidinei, Tatiane, Graziane, Ana, Tobias e Bernardo. Agradeço a oportunidade de conviver com pessoas como vocês e as inúmeras ajudas prestadas.

A todos os colegas da Ciência do Solo que tive oportunidade de conviver, ter cursado disciplinas juntos, viagens à congressos e momentos de confraternização, deixo minha satisfação;

De forma especial a Carla Tatiana Chaves Cepik, pois considero ter sido a pessoa que me despertou para a pós-graduação. Também aos seus ensinamentos e conselhos, assim como dos doutores Josué Beutler e Henrique

Debiasi, vocês foram muitas vezes orientadores, para sempre serei grato;

A equipe do Projeto de Integração Lavoura-pecuária, em especial ao professor Paulo Cesar de Faccio Carvalho e Ibanor Anghinoni, assim como todos os colegas com quem compartilhei atividades na área experimental na Fazenda do Espinilho;

Aos membros da Comissão Examinadora na qualificação do doutorado, professores Ibanor Anghinoni, Carlor Ricardo Trein e Vilson Klein e suas contribuições.

A todas as pessoas que participam ou participaram da minha vida nestes últimos quatro anos, e que de uma forma ou outra contribuíram de alguma forma para que pudesse chegar ao final de mais esta etapa;

E por último, mas de forma especial à minha namorada Kelly pelo companheirismo, carinho e atenção.

Mobilização, atributos de solo e variabilidade espacial em integração lavoura-pecuária ¹

Autor: Osmar Conte

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

RESUMO

Sistemas integrados de produção são cada vez mais adotados, pois permitem diversificar as atividades da propriedade, incrementar a renda e melhor satisfazer as necessidades sócioeconômicas do homem do campo. A integração lavoura-pecuária (ILP) assume estas funções no contexto produtivo nacional, com particularidades inerentes a cada região, principalmente em relação a solo e clima. No Brasil, a região subtropical adota sistemas de integração com pastagens cultivadas na entressafra da soja (inverno e primavera). Neste estudo investigou-se um sistema com produção de soja e pastagem para bovinos, de azevém e aveia preta mantida em diferentes alturas (10, 20, 30, 40 cm e sem pastejo) em sistema SPD. O experimento foi conduzido em São Miguel das Missões sobre Latossolo Vermelho distrófico. Foram abordados aspectos relacionados aos impactos dos bovinos sobre atributos físicos de solo, como a densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras. Também no ILP foi estudada a variabilidade espacial de atributos físicos de solo (resistência à penetração, força de tração), atributos químicos (macronutrientes, Al^{3+} , pH, índice SMP, saturação da CTC por bases e por Al^{3+}) e atributos da cultura da soja (produtividade, plantas por área, número de legumes por planta e massa de mil grãos). Avaliou-se a mobilização de solo em semeadura direta em função da profundidade de atuação das hastes sulcadoras, na presença de diferentes alturas de pastagem (em Latossolo), plantas de cobertura, condições de tráfego de máquinas e quantidades de resíduos sobre o solo, em Argissolo. A mobilização de solo foi avaliada por meio do índice de mobilização, obtido da razão entre a área de solo mobilizada no sulco e a profundidade de atuação. Concluiu-se que a adoção da ILP não afeta de forma significativa os atributos físicos de solo e nem a mobilização de solo pelas hastes sulcadoras. O índice de mobilização de solo foi diferente para Latossolo e Argissolo, e permitiu avaliar a eficiência das hastes com aumento na profundidade de atuação. A maior parte das variáveis abordadas apresentou dependência espacial, permitindo ser mapeadas, porém os tratamentos na pastagem não foram os causadores da variabilidade encontrada e os atributos estudados não explicaram a variabilidade na produtividade da soja.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (136 p.) Março, 2011.

Disturbance, soil attributes and spatial variability in crop livestock system

2

Author: Osmar Conte

Advisor: Prof. Dr. Renato Levien

ABSTRACT

The adoption of integrated production systems is increasing day-to-day since it allows farm activity diversification, profit increases and better satisfies farmers socio-economic needs. The crop-livestock integration (ILP) assumes these functions within national production, with specific peculiarities for each region, especially in relation to soil and climate conditions. In Brazil, the subtropical region adopts integrated systems with cultivated pastures in the off season (winter and spring). In this study the integration system consisted of soybean production under no-tillage during summer and ryegrass and black oat pasture maintained at different heights (10, 20, 30, 40 cm and no-grazing) during off-season. Aspects related to the impacts of cattle on soil physical attributes such as density, porosity, penetrometer resistance and draught force in shank of seed drill were approached. Also, under this system, variability of soil physical (penetrometer resistance, draught force), chemical (macro nutrients, Al^{3+} , pH, SMP index, base saturation and Al^{3+} saturation) and soybean (yield, initial stand, legumes per plant and grain mass) attributes were evaluated. Soil disturbance by the shank in different depth of operation, in different pasture heights (in Oxisol) cover crops, machinery traffic conditions and amounts of residue above the soil surface were evaluated. The soil disturbance was evaluated through the disturbance rate, obtained by the ratio between the area of disturbed soil in the groove and shank working depth. Also, under ILP system, spatial variability of soil physical (penetrometer resistance, draught force), chemical (nutrients, Al^{3+} , pH, SMP, CTC saturation of bases and Al^{3+}) and soybean (grain yield, plant per area, number of pods per plant and thousand grain weight) attributes were evaluated. The adoption of integrated crop livestock system does not significantly affect the soil physical attributes and soil shank disturbance. The rate of soil disturbed was different for Oxisol and Alfisol, allowing the evaluation of shank efficiency with increasing working depth. Most of the evaluated variables showed spatial dependence, allowing mapping, however grassland treatments were not the cause of such variability and the evaluated attributes did not explain the variability in soybean yields.

SUMÁRIO

^{2/} Doctoral thesis in Soil Science, Graduate Program in Soil Science, Agronomy School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. 136 pages. March 2011.

1. INTRODUÇÃO.....	1
2 CAPÍTULO I. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	5
2.1 Sistemas de integração lavoura-pecuária	5
2.2 Problemas inerentes à Integração Lavoura-Pecuária.	6
2.3 Conceituação e descrição do processo de compactação do solo	7
2.4 Compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas.....	8
2.5 Efeitos da compactação do solo.....	9
2.6 Hastes sulcadoras de solo em semeadura direta.....	10
2.7 Resistência mecânica do solo à penetração	15
2.8. Variabilidade espacial em atributos químicos e físicos de solo e da resposta das culturas	17
3 CAPÍTULO II. MOBILIZAÇÃO DE SOLO EM SEMEADURA DIRETA: ÍNDICE DE MOBILIZAÇÃO DE SOLO PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DE HASTES SULCADORAS DE SEMEADORAS.....	22
3.1 Introdução	22
3.2 Material e Métodos.....	26
3.2.1 Condição de Latossolo	27
3.2.2 Condição de Argissolo.....	27
3.2.3 Instrumentação para medir força de tração	28
3.2.4 Avaliação do solo mobilizado na linha de semeadura	28
3.3 Resultados e Discussão.....	30
3.4 Conclusões.....	36
4. CAPÍTULO III. MOBILIZAÇÃO DE SOLO EM SEMEADURA DIRETA: INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE NO ÍNDICE DE MOBILIZAÇÃO	37
4.1 Introdução	37
4.2 Material e Métodos.....	41
4.2.1 Condição de Latossolo	41
4.2.2 Condição de Argissolo.....	42
4.2.3 Avaliação da quantidade de solo mobilizado	43
4.3 Resultados e Discussão.....	44
4.4 Conclusões.....	49
5 CAPÍTULO IV. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA COM SEMEADURA DIRETA DE SOJA	50
5.1 Introdução	50
5.2 Material e Métodos.....	52
5.2.1 Amostragem para determinação da densidade e porosidade do solo.....	54
5.2.2 Avaliação da agregação do solo.....	55
5.2.3 Análise estatística.....	55
5.3 Resultados e Discussão.....	56
3.3.1 Evolução da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.....	56

3.3.2	Agregação do solo após sete anos de ILP	58
5.4	Conclusões.....	60
6	CAPÍTULO V. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DA SOJA, EM SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA	62
6.1	Introdução	62
6.2	Material e Métodos.....	65
6.2.1	Descrição da área experimental	66
6.2.2	Adubação da soja e da pastagem	66
6.2.3	Amostragem espacializada.....	67
6.2.4	Análise geoestatística de dados	69
6.3	Resultados e Discussão.....	70
6.3.1	Estatística descritiva para as diferentes variáveis em estudo.....	70
6.3.2	Parâmetros geoestatísticos obtidos dos semivariogramas ajustados para as diferentes variáveis em estudo.....	74
6.3.3	Variabilidade espacial das diferentes variáveis em estudo em sistema de integração lavoura-pecuária.....	80
6.3.3.1	Resistência mecânica do solo à penetração	80
6.3.3.2	Força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras	85
6.3.3.3	Atributos químicos de solo.....	90
6.3.3.4	Produtividade, número de legumes por planta e massa de mil grãos de soja	97
6.4	Conclusões.....	101
7	CONCLUSÕES GERAIS	102
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
9	RELAÇÃO DE APÊNDICES	126

RELAÇÃO DE TABELAS

1. Características físicas dos solos, na camada de 0 a 20 cm, determinadas conforme metodologias EMBRAPA (1997).....	26
2. Índice de mobilização de solo (IM) em função do tráfego de rodados de tratores e das profundidades de atuação da haste sulcadora, em Argissolo.....	45
3. Índice de mobilização de solo (IM) em função de alturas de manutenção da pastagem e profundidade de atuação da haste sulcadora, sob sistema de integração lavoura-pecuária, em Latossolo.	46
4. Índice de mobilização de solo (IM) em função da cultura de cobertura do solo e das profundidades de atuação das hastes sulcadoras, em Argissolo.....	47
5. Índice de mobilização de solo (IM) em função da quantidade de resíduos na superfície e das profundidades de atuação das hastes sulcadoras, em Argissolo.....	48
6. Tratamentos de altura de manejo do pasto nos tratamentos e respectivas áreas das parcelas do experimento.....	53
7. Evolução da densidade do solo, em diferentes camadas, em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.....	57
8. Evolução da macroporosidade do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.	57
9. Evolução da microporosidade do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.	58
10. Evolução da porosidade total do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.	58
11. Diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistema de integração agricultura-pecuária, submetido a intensidades de pastejo sob SPD.....	59
12. Estatística descritiva para resistência mecânica do solo à penetração (RP) em kPa, avaliada antes da semeadura da soja (novembro 2007) e após a colheita da soja (maio 2008).....	72
13. Estatística descritiva para força de tração média (FT) em hastes sulcadoras (N) operando em diferentes profundidades em duas épocas de avaliação.....	72
14. Estatística descritiva para atributos químicos do solo avaliados em duas profundidades, 0 a 10 e 10 a 20 cm, em dezembro de 2008.....	73

15. Estatística descritiva para produtividade de soja (kg ha^{-1}), número de plantas por m^2 , número de legumes por planta e massa de mil grãos de soja (g), safra 2007/08.....	74
16. Parâmetros do semivariograma ajustados para resistência mecânica do solo à penetração (kPa), em diferentes camadas do perfil do solo e em duas ocasiões de amostragem, (novembro de 2007 e abril de 2008).	76
17. Parâmetros do semivariograma ajustados para força de tração em hastes sulcadoras de semeadora-adubadora.	77
18. Parâmetros do semivariograma ajustados para variáveis químicas de solo avaliadas em duas profundidades.	78
19. Parâmetros do semivariograma ajustados para produtividade de soja (RG) em kg ha^{-1} , número de plantas por m^2 (P/ m^2), número de legumes por planta (L/P) e massa de mil grãos (MMG) em g.	80

RELAÇÃO DE FIGURAS

1. Perfilômetro de varetas (a) e representação gráfica do perfil obtido, leituras e média (b).....	29
2. Força de tração medida na haste sulcadora (N), em função da profundidade de operação, em Latossolo.....	31
3. Força de tração específica em diferentes ocasiões de amostragem e profundidades de regulagem da haste sulcadora, em Latossolo.....	32
4. Índice de Mobilização de solo em semeadura direta em função dos anos de amostragem e profundidade de sulcamento, em Latossolo.....	33
5. Índice de Mobilização (IM) e Força de Tração Específica (FTE) em função das profundidades de atuação das hastes da semeadora, em Latossolo.....	34
6. Índice de Mobilização (IM) e Força de Tração Específica (FTE), em função das profundidades de atuação das hastes da semeadora, em Argissolo.....	34
7. Índice de mobilização, obtidos em função da profundidade de atuação das hastes da semeadora, para a condição de Latossolo e Argissolo.	36
8. Mapa da área experimental em São Miguel das Missões, com divisão das parcelas (P1 a P12) e blocos separados pelas faixas sem pastejo (Test 1 e Test 2).	54
9. Distribuição espacial da resistência mecânica do solo à penetração (kPa) avaliada no final do período de pastejo e antes da semeadura da soja, (novembro de 2007), em sistema de integração lavoura-pecuária, em três profundidades: A (0 a 10), B (10 a 20) e C (20 a 30) cm.....	83
10. Distribuição espacial da resistência mecânica do solo à penetração (kPa) avaliada no momento da colheita da soja, (abril de 2008), em sistema de integração lavoura-pecuária, em três profundidades: A (0 a 10), B (10 a 20) e C (20 a 30) cm.	84
11. Distribuição espacial da força de tração em haste sulcadora avaliada na semeadura da soja safra 2007/08 em três profundidades de trabalho de haste sulcadora: A (6), B (9) e C (12) cm.	88
12. Distribuição espacial da força de tração em haste sulcadora avaliada na semeadura da soja safra 2008/09 em três profundidades de trabalho de haste sulcadora: A (9), B (12) e C (15) cm.	89
13. Distribuição espacial dos teores de fósforo (mg dm^{-3}) no solo, nas camadas 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B), e potássio (mg dm^{-3}) na camada 0 a 10 cm (C) e 10 a 20 cm (D).	93
14. Distribuição espacial dos teores de cálcio (mg dm^{-3}) no solo nas camadas 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B), e o teor de magnésio (mg dm^{-3}) na camada de 10 a 20 cm(C).....	94
15. Distribuição espacial dos teores de alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) nas	

camadas de 0 a 10 (A) e 10 a 20 cm (B), e matéria orgânica do solo (%) nas camadas 0 a 10 (C) e 10 a 20 cm (D).	95
16. Distribuição especial do pH do solo na camada 10 a 20 cm (A); SMP na camada 0 a 10 cm (B) e saturação da CTC por bases (%) (C).	96
17. Distribuição Distribuição espacial da produtividade de soja, kg ha ⁻¹ (A), número de legumes por planta (B) e massa de mil grãos de soja, g (C) safra 2006/07.....	99
18. Correlação entre produtividade de soja (kg ha ⁻¹) e os componentes de produtividade; número de legumes por planta, massa de mil grãos e plantas por área (m ²).	100

RELAÇÃO DE APÊNDICES

1. Semivariogramas para resistência do solo à penetração mecânica, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, avaliada na semeadura da soja.....	127
2. Semivariogramas para resistência do solo à penetração mecânica, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, avaliada na colheita da soja.....	128
3. Semivariogramas para força de tração em haste sulcadora, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), nas profundidades 6, 9 e 12 cm, avaliada na semeadura da soja safra 2007/08.....	129
4. Semivariogramas para força de tração em haste sulcadora, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), nas profundidades 9, 12 e 15 cm, avaliada na semeadura da soja safra 2008/09.....	130
5. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, fósforo e potássio, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.....	131
6. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, cálcio e magnésio, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.....	132
7. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, alumínio e matéria orgânica do solo, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.....	133
8. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, pH e SMP, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.....	134
9. Semivariogramas para saturação da CTC do solo, por bases trocáveis e por Al^{3+} nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.....	135
10. Semivariogramas para atributos de soja: produtividade $kg\ ha^{-1}$, número de legumes por planta, plantas por m^2 , e massa de 1000 grãos, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar (Co + C) e alcance (Ao), avaliada na safra 2007/08.....	136

1. INTRODUÇÃO

As preocupações em relação à eficiência dos sistemas de preparo do solo são crescentes na agricultura em todo o mundo. A fim de aumentar a eficiência no processo produtivo agrícola, novas formas de preparo do solo vêm sendo propostas e experimentadas visando minimizar e/ou eliminar as perdas de solo por erosão, perdas estas características de formas convencionais de preparo e semeadura. Também são cada vez mais preocupantes as perdas de água do sistema de produção, não somente por reduzir o armazenamento no solo e decorrente suprimento à demanda das culturas e processo evaporativo, mas pelo transporte por essa de solutos, sejam eles fertilizantes, agroquímicos ou qualquer outro elemento potencialmente poluente para recursos de água.

Dentre as alternativas que estão sendo utilizadas desde a década de 80, destaca-se a técnica conhecida por Sistema Plantio Direto (SPD), que tem grande aceitação entre os produtores agrícolas. No entanto, em áreas onde este sistema está implantado há mais tempo ou então onde existe a adoção do sistema integração lavoura-pecuária, pode ocorrer compactação de solo superficial, que pode levar a redução da eficiência produtiva das culturas, assim como perda da capacidade de trabalho dos tratores e máquinas de semeadura, pelo aumento na demanda de potência e tração.

O Planalto Médio gaúcho é uma região tradicional de produção de grãos de milho e soja durante a primavera/verão. As condições edafoclimáticas dessa região a tornam adequada ao cultivo, no outono/inverno, de cereais como o trigo, aveia e a cevada. Entretanto, o baixo retorno econômico propiciado pelos cereais da estação fria tem motivado os produtores a buscarem novas alternativas para este período, entre as quais se destaca a implantação de pastagens anuais, em sua maioria constituída por gramíneas forrageiras (aveia preta, azevém, ou consórcio de ambas), destinadas principalmente à

terminação de bovinos de corte. Tal situação configura um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP). No entanto, se não houver adequação da intensidade de pastejo, o pisoteio animal pode resultar na compactação do solo (Kochhann et al., 2000; Botta, 2006), principalmente se o mesmo ocorrer sob elevados teores de água no solo (Jorajuría Colazo, 2005). A importância desse problema cresce porque a maior parte das áreas agrícolas, nessa região são manejadas sob SPD. O processo de compactação do solo, ao aumentar a sua densidade e resistência mecânica à penetração (RP), bem como ao reduzir o volume de macroporos, a capacidade de infiltração de água, a aeração e a condutividade hidráulica (Dias Junior & Pierce, 1996), pode resultar na diminuição da produtividade das culturas (Beutler et al., 2005) e em prejuízos ao ambiente. Além da compactação do solo, o pastejo intenso poderá diminuir o carbono orgânico do solo pela redução da entrada de biomassa e aceleração da taxa de oxidação de matéria orgânica.

O uso de hastes sulcadoras para a deposição do adubo, durante a semeadura das culturas estivais, ao ocasionar maior mobilização de solo comparativamente aos discos duplos (Mnztfa 1998), constitui-se em uma alternativa para contornar problemas relacionados à compactação superficial do solo que, além de ser a mais prejudicial ao crescimento das plantas (Unger & Kaspar, 1994), é a de ocorrência mais comum em áreas submetidas a pisoteio animal (Broch, 1997). Além disso, o uso de hastes sulcadoras permite a deposição do fertilizante a maiores profundidades, o que pode estimular o aprofundamento das raízes, tendo em vista que os nutrientes, em SPD tendem a se concentrar na superfície do solo e, desse modo, minimizar os efeitos da compactação sobre o crescimento das plantas. Porém, o emprego de hastes sulcadoras, em substituição aos discos duplos, aumenta o requerimento de força de tração (FT) e o consumo de combustível, diminuindo a velocidade de deslocamento do conjunto trator/semeadora quando comparado o mesmo número de linhas (Silva, 2003).

A FT demandada por hastes sulcadoras que equipam semeadoras-adubadoras pode ser afetada, entre outros fatores, pelo estado de compactação do solo (Sánchez-Girón et al., 2005). Diante disso, é possível que o aumento da intensidade de pastejo resulte num incremento da demanda de tração das hastes sulcadoras, evidenciando assim a existência de

correlação significativa entre essa variável e o grau de compactação do solo. Tal fato possibilitaria o uso da FT como indicador do estado de compactação do solo, conforme sugerido por Cepik (2005) e Mouazen & Ramon (2006). Entretanto, a relação entre FT e grau de compactação pode ser modificada quando do uso de hastes e ponteiras com geometrias diferentes ou mediante a alteração da profundidade de atuação, pois esses são alguns dos fatores que influenciam a FT exigida pelas hastes sulcadoras (Conte et al., 2007). Cabe ainda salientar que o estudo de correlação entre a FT demandada por hastes sulcadoras e o estado de compactação exige a utilização de um indicador confiável da magnitude desse último. A RP é um dos indicadores do estado de compactação do solo mais utilizados atualmente, devido à facilidade e rapidez de execução do ensaio (Chancellor, 1994), bem como a sua maior sensibilidade à mudanças do manejo comparativamente à densidade do solo (Botta et al., 2006).

Amado et al., (2005) afirmam que a compactação do solo em SPD pode comprometer a produtividade das culturas. O monitoramento dessa compactação do solo via emprego de penetrômetros e com mapeamento de sua ocorrência vêm surgindo como uma nova proposta entre a assistência técnica. Gassen (2006) e Santi et al. (2006), demonstraram que o uso de mapeamento de resistência do solo à penetração é uma ferramenta no diagnóstico de compactação de solo, trabalhando em Latossolos do Planalto do RS. Também demonstraram que o “grid” amostral para amostragem desta variável pode variar de 100 a 10.000 m².

Considerando que a RP é um método clássico e eficiente para o diagnóstico do estado de compactação do solo (Chancellor, 1994), e que, conforme demonstrado por Conte et al. (2007), essa medida apresenta correlação significativa com a FT medida nas hastes sulcadoras de semeadoras, conclui-se que a mesma é capaz de diagnosticar alterações na estrutura do solo, como a compactação. Dessa forma, o uso de hastes sulcadoras instrumentadas para aquisição dos dados de FT durante a semeadura das culturas de primavera/verão, em conjunto com um sistema de posicionamento global (GPS), pode fornecer um diagnóstico especializado do estado de compactação do solo. Esse método pode substituir, ao menos em parte, outras avaliações específicas para esse fim. No entanto, é preciso levar

em consideração que a geometria da haste e da ponteira e sua profundidade de atuação, assim como o conteúdo de água do solo e a presença de disco de corte atuando anteriormente à passagem das hastes sulcadoras, afetam a resposta da FT ao grau de compactação do solo. De modo geral, esses resultados corroboram com os obtidos por Adamchuk & Molin (2006), que demonstraram que o uso de hastes instrumentadas com sensores de FT e aquisição georeferenciada de dados permitiu mapeamento de áreas com maior eficiência do que o uso de penetrômetros de cone.

Para melhor entendimento do comportamento do solo frente às pressões responsáveis pela compactação, oriundas do pisoteio animal, que seriam responsáveis pelo aumento no esforço de tração determinado nas hastes sulcadoras, concomitantemente serão feitas avaliações de RP, assim como do conteúdo de água do solo no momento das demais avaliações. Também foram analisados atributos químicos de solo a fim de contar com maior número de variáveis que interferem no desempenho produtivo da soja, cultivada na sequência da pastagem estival. Nesta, além da produtividade se subdividirá em componentes de produção, como plantas por área, número de legumes por planta e massa de mil grãos. Por fim, no conjunto de dados de solo, físicos e químicos e componentes de produtividade da soja buscar-se-á explicar a variabilidade espacial da produtividade da soja e a influência dos tratamentos aplicados na pastagem na variabilidade espacial dos diferentes atributos analisados.

No contexto acima abordado prece-se como tema para a tese de doutorado “Variabilidade espacial do esforço de tração em hastes sulcadoras de semeadoras, atributos físicos de solo e sua influência na produtividade da soja, em sistema de Integração Lavoura-Pecuária”.

Como objetivo geral pretende-se demonstrar a dependência espacial de atributos físicos e químicos de solo, assim como, os da cultura da soja, e se os tratamentos impostos à pastagem estão gerando variabilidade espacial nas diferentes variáveis analisadas.

2 CAPÍTULO I. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1 Sistemas de integração lavoura-pecuária

O termo integração lavoura-pecuária (ILP) é utilizado para designar a alternância de cultivo de grãos e pastejo de animais em pastagens de gramíneas e/ou leguminosas sempre que ambas as atividades são conduzidas sob uma mesma área ou que tenham um mínimo de interface (Moraes et al., 1998). Já Mello (2001) define ILP como um sistema que integra as duas atividades com os objetivos de maximizar racionalmente o uso da terra, da infraestrutura e da mão-de-obra, minimizar custos, diluir os riscos, diversificar e verticalizar a produção e agregar valores aos produtos agropecuários pelo uso dos recursos e benefícios que uma atividade proporciona à outra.

Mais recentemente, pesquisadores de diversos centros da Embrapa formularam um novo e amplo conceito para ILP, conforme descrito por Macedo, (2009) “Integração lavoura-pecuária são sistemas produtivos de grãos, fibras, carne, leite, lã, e outros, realizados na mesma área, em plantio simultâneo, sequencial ou rotacionado, onde se objetiva maximizar a utilização dos ciclos biológicos das plantas, animais, e seus respectivos resíduos, aproveitar efeitos residuais de corretivos e fertilizantes, minimizar e otimizar a utilização de agroquímicos, aumentar a eficiência no uso de máquinas, equipamentos e mão-de-obra, gerar emprego e renda, melhorar as condições sociais no meio rural, diminuir impactos ao ambiente, visando à sustentabilidade.

2.2 Problemas inerentes à Integração Lavoura-Pecuária.

Numa primeira etapa, o pastejo resulta no desfolhamento da pastagem e a conseqüente perda da cobertura vegetal. Ao mesmo tempo, tem-se a aplicação de tensões ao solo por meio do pisoteio dos animais (Taboada, 2005). Isso pode resultar em aumento da perda de água por evaporação e na compactação do solo, que se constitui numa das principais causas da degradação da capacidade produtiva de solos agrícolas (Albuquerque et al. 2001). De uma maneira geral, todos os solos sob pastejo sofrem compactação devido ao tráfego dos animais, sobretudo os mais argilosos quando úmidos (Tanner & Mamaril, 1959; Trein et al. 1991; Correa & Reichardt 1995) ou quando são utilizadas intensidades de pastejo demasiadamente altas (Bertol et al. 1998; Bertol et al. 2000).

A perda de produtividade de uma pastagem cultivada pode derivar principalmente do manejo inadequado do solo, embora muitas vezes se procure associar a sua degradação exclusivamente com a redução da fertilidade do solo. No entanto, respostas insatisfatórias à adubação podem ser resultantes da degradação física do solo, devido ao aumento da densidade, (Camargo & Aleoni, 1997). Mesmo com bons níveis de fertilidade, a degradação física do solo pode inviabilizar a pastagem. A compactação degrada a qualidade física do solo, reduzindo a produtividade do sistema (Silva et al. 1997). Estes autores também relatam que altas pressões são aplicadas ao solo pelos cascos dos animais. Estimaram em 0,35 MPa a pressão aplicada no solo por um bovino de 400 kg, que ocasionou compactação na profundidade de 7 a 10 cm. Comentam ainda, que num sistema de pastejo intensivo, o fator do solo determinante na redução da produtividade das culturas é a degradação da sua qualidade física, a qual está associada à compactação.

Segundo Souza et al. (1998), bovinos em pastejo exercem uma pressão ao solo 106% superior à exercida por pneus de tratores. Watkin & Clements (1978) estimaram a carga estática exercida no solo por bovinos entre 112 e 165 kPa, admitindo que durante a movimentação dos animais, esses valores são consideravelmente maiores, devido ao apoio não ocorrer em todos os membros locomotores.

De acordo com Salton et al., (1999b), para a sustentabilidade do SPD, em

muitas situações, faz-se necessário integrar a produção de grãos com produção de forragens, sendo uma prática usual o cultivo de espécies forrageiras na entressafra. O pisoteio dos animais pode causar alterações nos atributos físicos do solo. Em pastejo de aveia, em um Latossolo Roxo distrófico, os autores concluíram que houve aumento da densidade do solo, na camada de 0-5 cm, em mais de 50% da área.

Lanzanova et al. (2004), ao avaliarem a infiltração de água no solo pelo método dos anéis concêntricos em área com influência de pastejo, encontraram sensível redução na taxa de infiltração à medida que foi reduzido o tempo de retorno dos animais aos poteiros. Atribuíram a redução na infiltração e, conseqüentemente, na lâmina de água infiltrada à degradação da estrutura superficial do solo pela ação da pressão aplicada pelo casco dos animais.

Para Cassol (2003), uma pastagem mal manejada, em termos de carga animal, resultará numa baixa produção de massa de forragem, compactação superficial, diagnosticada por aumento na densidade do solo e redução da macroporosidade, com decorrente redução da taxa de infiltração e infiltração acumulada de água.

2.3 Conceituação e descrição do processo de compactação do solo

A compactação constitui-se em uma das principais causas da degradação da qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas. Hillel (1982) define a compactação como sendo o processo de redução de volume de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual se encontra relacionado à expulsão de ar. A compressão do solo somente ocorre quando a tensão, gerada a partir da aplicação de uma carga na superfície do mesmo, ultrapassar a capacidade de resistência ao cisalhamento nos pontos de contato entre as partículas, provocando a sua ruptura (Braida, 2004). É importante lembrar que as principais pressões externas que podem comprimir o solo são pisoteio animal (Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; Imhoff et al., 2000; Silva et al., 2000) e tráfego de máquinas agrícolas (Novak et al., 1992; Tormena et al., 1998; Canillas & Salokhe, 2001).

2.4 Compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas

Reconhecidamente, a compactação superficial do solo pelo tráfego de máquinas depende da pressão de contato pneu/solo, enquanto que a subsuperficial está relacionada à massa sobre os rodados (Jorajuria & Drag, 1997; Raper, 2005). De acordo com Sánchez-Girón (1996), a compactação subsuperficial é aquela que ocorre a profundidades maiores do que 0,3 m. Conforme o autor, em qualquer um dos casos, a compactação só ocorre se a tensão exercida pelos rodados ultrapassar a resistência do solo à deformação.

A pressão de contato pode ser reduzida por meio da diminuição na massa sobre o eixo ou aumento na área de contato entre o rodado e o solo (Novak et al., 1992; Raper, 2005). O incremento da área de contato, por sua vez, pode ser obtido mediante o emprego de rodados de maiores dimensões (esteiras ou pneus mais largos e de maior diâmetro), do pareamento de pneus ou do aumento na flexibilidade da carcaça dos pneus (O'sullivan et al., 1999; Canillas & Salokhe, 2001; Raper, 2005). Estas duas opções, porém, resultam em aumento na área trafegada. Hillel (1982) salienta ainda que a deformação dos pneus absorve parte das tensões que surgem na interface rodado/superfície de rolamento, diminuindo assim a magnitude das que incidem sobre o solo. As propriedades mecânicas do solo também influenciam na área de contato. Neste sentido, solos com menor resistência à deformação permitem um maior recalque dos rodados, aumentando, dessa forma, a área de contato (Sánchez-Girón, 1996; O'sullivan et al., 1999). De maneira geral, Hakansson et al., (1988) expõem que as pressões de contato pneu-solo variam de 100 a 150 kPa para tratores e de 200 a 300 kPa para colhedoras.

A distribuição da pressão na área de contato solo/rodado não é uniforme, e desta forma as mesmas podem se concentrar em alguns pontos, como nas garras dos pneus (Bailey et al., 1995; Radforda et al., 2000).

Além das tensões normais à superfície trafegada, é necessário considerar também as tensões cisalhantes (Bailey et al., 1995). Quando um rodado patina, a compactação resultante pode ser maior (Raper, 2005), porque à pressão de contato pneu/solo é adicionada a deformação produzida pelos esforços aplicados pelos rodados (Sánchez-Girón, 1996).

As tensões aplicadas pelos rodados se distribuem horizontal e

verticalmente no solo, formando isolinhas a partir do centro do rastro, em forma de bulbos (Chancellor, 1994; Sánchez-Girón, 1996; O'sullivan et al., 1999). A forma com a qual as tensões se distribuem lateralmente e em profundidade depende das propriedades mecânicas do solo e das características dos rodados (Sánchez-Girón, 1996).

2.5 Efeitos da compactação do solo

Os efeitos da compactação do solo sobre as suas propriedades físicas resultam do impacto negativo deste processo sobre os diferentes níveis hierárquicos que compõe a estrutura do solo (Dexter, 1988). Dias Junior & Pierce (1996) relatam que a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica e diminui a porosidade total em função da redução no volume de macroporos, enquanto o de microporos permanece praticamente inalterado. Os mesmos autores mostram ainda que a compactação do solo resulta na diminuição da capacidade de infiltração de água e da condutividade hidráulica do solo, bem como no aumento do escoamento superficial e das taxas de perda de água e solo (erosão). Reduções significativas na produtividade de diversas culturas, em razão da compactação do solo, têm sido relatadas com frequência na literatura (Unger & Kaspar 1994; Beulter & Centurion, 2004).

Os efeitos negativos da compactação sobre o desenvolvimento e produtividade das culturas parecem estar relacionados principalmente às condições de aeração e à resistência mecânica junto ao ambiente radicular. Alguns trabalhos de pesquisa (Tormena, 1998; Imhoff, 2002) têm evidenciado que à medida que o grau de compactação aumenta o conteúdo de água em que porosidade de aeração considerada como sendo crítica (10%) é atingida diminui. Por outro lado, a compactação aumenta o conteúdo de água abaixo do qual a RP torna-se superior ao valor crítico de 2 MPa. Assim, em solos compactados, observa-se um incremento na probabilidade de ocorrência de teores de conteúdo de água restritivos ao crescimento das plantas. Desta forma, os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas tendem a ser mais pronunciados sob condições de excesso ou déficit hídrico (Unger & Kaspar, 1994). Tanto a deficiência de oxigênio (Hillel, 1982), quanto à elevada

resistência à penetração (Unger & Kaspar, 1994; Chan & Heenan, 1996; Silva & Rosolem, 2002; Rosolem et al., 2002; Foloni et al., 2003; Tubeileh et al., 2003; Beulter & Centurion, 2004), diminuem o crescimento e a efetividade das raízes, afetando negativamente a absorção de nutrientes e água, por reduzir o volume de solo explorado pelo sistema radicular; portanto, o efeito da compactação é tão mais prejudicial quanto mais próxima da superfície ela se localizar (Unger & Kaspar, 1994).

A compactação afeta também a disponibilidade de água às plantas. De maneira geral, solos compactados se caracterizam por uma baixa capacidade de infiltração de água e condutividade hidráulica (Dexter, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996; Raper, 2005). Devido à baixa capacidade de infiltração, o volume total de água armazenado tende a ser menor em solos compactados (Raper, 2005). Além disso, a compactação modifica a distribuição dos poros segundo o seu diâmetro, diminuindo a proporção de macroporos (Dias Junior & Pierce, 1996; Secco et al., 2004), o que, considerando um mesmo conteúdo de água, aumenta a energia com a qual a água é retida (Reichardt & Timm, 2004). Dessa forma, conforme os mesmos autores, a compactação pode dificultar o movimento de água do solo até a planta, haja vista que a intensidade deste processo é dada pelo produto do gradiente de potencial hídrico com a condutividade hidráulica.

2.6 Hastes sulcadoras de solo em semeadura direta

Sulcadores são elementos mecânicos utilizados em semeadoras, a maioria dos quais empregados para assegurar a deposição de fertilizantes e de sementes no solo, e promove condições ótimas para sua germinação e desenvolvimento. Portella (1983) e Balestreire (1987) mencionam que basicamente existem três tipos de sulcadores: hastes, discos simples e discos duplos, tendo o de disco simples pouco usado no Brasil.

Um dos problemas inicialmente enfrentados na adoção de preparos conservacionistas e semeadoras-adubadoras que empregam hastes foi o embuchamento causado pelos restos culturais sobre a superfície do solo (Derpsch et al., 1986), problema este resolvido pelo emprego de discos de corte de resíduos, colocados à frente destes mecanismos sulcadores.

A produtividade das culturas, bem como seu pleno desenvolvimento, dependem de diversos fatores, entre eles, as propriedades físicas do solo. Para tanto, a configuração de elementos sulcadores, deve respeitar essas propriedades do solo. Isto justifica a existência de diferentes configurações de elementos sulcadores (Portella 1983).

Os mecanismos sulcadores têm por função estabelecer a relação entre solo e a máquina de semeadura, criando o sulco onde são depositados as sementes e o fertilizante. Bertol et al., (1997) desenvolveram estudo relacionando diferentes tipos de sulcadores com as variáveis rugosidade e cobertura vegetal. Concluíram que sendo a cobertura do solo comprovadamente eficaz quanto ao controle de invasoras, é desejável utilizar sulcadores que proporcionem menor largura de sulco, protegendo a linha de semeadura de possíveis invasoras e a competição por elas gerada. Entre os sulcadores utilizados (disco duplo defasado, duplo e disco côncavo), o de disco côncavo foi o que mais reduziu a cobertura do solo, o que pode ser explicado pelo fato do deslocamento se dar em ângulo, diminuindo a cobertura de solo e causando maior largura de sulco.

Em estudo de forças atuantes em elementos sulcadores de semeadura comerciais para SPD, Portella (1983), mediu os valores de 70,5, 71,28 e 39,85 kgf, respectivamente em disco de simples, disco duplo e facão, para uma profundidade de 5 cm, em SPD.

Segundo Faganello (1989), o elemento sulcador triplo disco apresentou menor profundidade de penetração do que os sulcadores facão e disco simples no sistema de SPD. Na média das três profundidades de trabalho (5, 10 e 15 cm), o autor constatou que estas foram significativamente diferentes entre si. As variáveis sulcador e profundidade de trabalho foram significativas, indicando que as diferenças entre os sulcadores e entre as profundidades não foram ao acaso. Quanto ao sulcador facão, houve significativa redução do índice de cone no sulco, em relação aos demais elementos sulcadores analisados (triplo disco e disco duplo defasado).

Klein & Boller (1995), avaliando a resposta da cultura do milho e a densidade do solo em diferentes manejos (plantio direto, arado de discos + grade de discos, escarificação + grade de discos e escarificador protótipo), verificaram que no tratamento SPD, a produtividade da cultura do milho foi

afetada positivamente pela utilização do sulcador facão na semeadora-adubadora. E na camada superficial do solo (0 a 5 cm), o tratamento SPD apresentou maiores valores de densidade do solo, demonstrando compactação.

Já Casão Júnior et al. (1998) verificaram que a FT exigida pela semeadora-adubadora testada aumentou em função da velocidade de deslocamento, da profundidade de atuação do sulcador do tipo facão e do conteúdo de água do solo, quando esse passou da condição friável à plástica. Os sulcadores do tipo facão normalmente possuem ângulo de ataque que facilita sua penetração no solo. Isto evita que as semeadoras equipadas com este mecanismo necessitem de transferência total de massa da máquina para promover a penetração do disco de corte dos resíduos e dos discos duplos (sulcadores para deposição das sementes) no solo, além de promover preparo localizado, em profundidade (8 a 15cm), onde será depositado o adubo.

Uma medida que pode colaborar para reduzir o efeito da compactação do solo, em sistema de semeadura direta, envolve uso de hastes sulcadoras, operando a maiores profundidades. Tal procedimento possibilita o rompimento de camadas compactadas superficialmente, as quais são comuns em sistemas de semeadura direta (Tormena et al., 1998) e são as mais prejudiciais às culturas (Unger & Kaspar, 1994). Neste sentido, Mello et al. (2002) verificaram que, em um Latossolo Vermelho distrófico típico, o uso de haste sulcadora em comparação aos discos duplos aumentou em mais de 10% a produtividade do milho. Já Silva (2003) obteve, num, Nitossolo Vermelho distroférico e sob ausência de deficiência hídrica, que a produtividade do milho não respondeu significativamente ao uso de hastes em substituição aos discos duplos. Ainda conforme Mello et al. (2002), a mobilização superficial do solo pela haste sulcadora acarretou na redução da sua densidade e resistência mecânica, e num aumento da macroporosidade. O uso de hastes sulcadoras em relação aos discos duplos aumentou a demanda de força de tração e o consumo de combustível, além de diminuir a velocidade de deslocamento do conjunto trator/semeadora e, conseqüentemente, a capacidade de campo efetiva (Silva, 2003).

A resposta das culturas à profundidade de atuação das hastes, em termos de produtividade, parece estar relacionada à disponibilidade hídrica. Herzog

(2003), avaliando o efeito da quantidade de resíduos de aveia preta na superfície do solo e da profundidade de atuação da haste sulcadora (6 e 12 cm) sobre a soja safra 2001/02, com e sem irrigação, concluiu que a produtividade desta cultura não foi afetada pelos tratamentos, tanto na condição irrigada quanto na não irrigada. O autor atribuiu este resultado à uniformidade e volume adequados de chuva, especialmente durante os períodos críticos da cultura. Trabalhando na mesma área experimental e sob os mesmos tratamentos, porém, na safra 2003/04, onde uma considerável deficiência hídrica foi observada, Xavier (2005) obteve que, na condição não irrigada, a produtividade da soja foi 10% (180 kg ha^{-1}) maior quando a haste atuou a 12 cm em relação à profundidade de 0,06 m. Sob irrigação, a profundidade de deposição do fertilizante não influenciou a produtividade desta cultura. Silva (2003) também concluiu que, na ausência de deficiência hídrica, a produtividade do milho não aumentou em função do incremento da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de adubo.

Por outro lado, os resultados obtidos por Beutler (2005) sugerem que, quando o déficit hídrico é muito forte ou ocorre em um período crítico da cultura, bem como numa situação em que o solo encontra-se muito compactado, a mobilização superficial pelas hastes sulcadoras pode não ser suficiente para aliviar os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas. Avaliando a resposta da soja e do milho a diferentes coberturas de inverno (aveia preta, aveia preta + ervilhaca e campo nativo) e à profundidade de deposição do adubo (6 e 12 cm), na safra de 2002/03, o autor encontrou que, embora tenha ocorrido deficiência hídrica no pendoamento, a produtividade do milho foi maior para a profundidade de 12 cm apenas quando a cultura de inverno antecessora foi o campo nativo. Nas demais coberturas de solo de inverno, não houve diferenças significativas para a profundidade de colocação do adubo. A profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo não resultou em efeitos significativos sobre a produtividade da soja. Já na safra 2003/04, onde nova estiagem ocorreu, em um período tal que a principal cultura afetada foi a da soja, a profundidade de deposição do adubo não modificou de maneira significativa a produtividade tanto do milho quanto da soja, independentemente da cultura antecessora de inverno.

O aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras para

adubo acarreta em um maior custo energético e econômico. Os dados reportados por Xavier (2005) mostram que, quando a profundidade de atuação da haste passou de 6,4 cm para 10 cm, a FT por haste e por unidade de volume de solo mobilizado aumentou, respectivamente, 95 e 260%. A patinação do trator dobrou quando o sulcador atuou na maior profundidade (9,6% a 6,4 cm, contra 19% a 10,0 cm). Resultados semelhantes foram obtidos por Beutler (2005). Silva (2003) encontrou que a demanda de FT de uma semeadora equipada com quatro linhas aumentou de 9 para 25 kN quando a profundidade de atuação da haste passou de 10 para 30 cm, o que resultou num consumo de combustível de, respectivamente, 10,1 e 14,3 L h⁻¹. Além disso, o aumento da profundidade de trabalho da haste sulcadora promoveu uma redução na velocidade de deslocamento do conjunto trator/semeadora e, assim, da capacidade de campo efetiva. Embora não tenha medido o consumo de combustível, Xavier (2005) afirma que o aumento na produtividade da soja observado na safra 2003/04 compensa o maior custo operacional quando do aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo, incrementando a lucratividade financeira.

Hastes sulcadoras, com ponteiros estreitos, como as que equipam a maior parte dos modelos de semeadoras-adubadoras adequadas à semeadura direta, apresentam uma capacidade limitada de atuar com eficiência quando se aumenta a profundidade de operação, devido às inter-relações da haste com o solo e ao comportamento de ruptura da estrutura do solo (Godwin & O'Dogherty, 2007; Hemmat & Adamchuk, 2008). Hastes de ponteiros estreitos operando profundamente poderá superar a chamada profundidade crítica de trabalho, (O'Callaghan & McCullen, 1965, Godwin, 2007), a partir da qual ocorrem aumentos de demanda de força de tração (FT) sem um proporcional aumento na mobilização de solo. Quando estas operam em profundidades menores do que a profundidade crítica ocorre movimentação de solo em três direções: para frente, para cima e lateralmente (Godwin & O'Dogherty, 2007). Quando a profundidade de trabalho ultrapassa o valor referente à profundidade crítica, solo é deslocado predominantemente para frente e lateralmente, reduzindo, assim, a área fraturada da seção transversal do sulco e, conseqüentemente, o volume de solo mobilizado. Este fato torna-se relevante quando da aplicação de hastes sulcadoras com o propósito de melhorias na

condição física do solo, em sistemas conduzidos sob semeadura direta, pois determina a eficiência de trabalho dos sulcadores, tanto no que se refere à ação pretendida de mobilizar solo no sulco de semeadura, quanto ao dispêndio energético e capacidade operacional do conjunto trator-semeadora. Valores de referência para a profundidade crítica de trabalho de ferramentas de mobilização do solo do tipo haste podem ser obtidos a partir da relação profundidade de trabalho e largura da ponteira da haste. Em geral, a profundidade crítica equivale a 5 a 7 vezes a largura da ponteira (Godwin & O`Dogherty, 2007). O ângulo de ataque da haste (Godwin & O`Dogherty, 2007) e características do solo, tais como o conteúdo de água, o grau de compactação e o ângulo de atrito interno (Sánchez-Gijón, 1996), também interferem na forma de ruptura e mobilização de solo e, conseqüentemente, na profundidade crítica.

2.7 Resistência mecânica do solo à penetração

A quantificação da RP tem sido feita mediante o emprego de equipamentos denominados de penetrômetros. Chancellor (1994) expõe que existem diversos tipos de penetrômetros; contudo, os mais utilizados são aqueles constituídos por uma haste metálica que apresenta um cone em uma de suas extremidades. Esta haste é empurrada através do solo medindo-se, através de células de carga ou anéis dinamométricos, a força necessária para que o cone penetre no solo até uma dada profundidade. Dessa forma, foram desenvolvidas normas técnicas que padronizam as características construtivas e os procedimentos para a obtenção dos dados de RP. A norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004) estabelece que, entre outros aspectos, o cone deve perfazer um ângulo de 30° em relação à vertical; a área da base do cone deve ser de 323 e de 130 mm², respectivamente, para solos macios e duros; e o desgaste máximo permitido é de 3% em relação ao diâmetro recomendado. O procedimento a ser adotado durante os ensaios de RP é descrito pela norma ASAE EP542 (1999). Os aspectos de maior relevância a serem observados durante o ensaio referem-se à velocidade de penetração (constante e equivalente a 30 mm s⁻¹), ao conteúdo de água do solo (execução do ensaio quando o conteúdo de água estiver próxima à da capacidade de campo) e à

limpeza do cone.

Vários trabalhos têm comprovado que a RP aumenta com a redução do conteúdo de água e diminui, com a redução da densidade do solo (Klein et al., 1998; Silva, 2003). A diminuição do índice de cone de acordo com o incremento no conteúdo de água é mais pronunciada para solos argilosos comparativamente aos arenosos (Mapfumo & Chanasyk, 1998). Dessa forma, a análise correta dos dados RP exige o conhecimento do conteúdo de água sob o qual o ensaio de penetrometria foi executado.

Embora o crescimento radicular seja altamente correlacionado com a resistência à penetração, os mecanismos de atuação das raízes e dos penetrômetros são notadamente distintos (Leão, 2002). Bengough & Mullins (1990), tendo como base a análise de diversos trabalhos de pesquisa, afirmam que a resistência do solo ao cone pode ser de duas a oito vezes maiores que aquela encontrada pelas raízes, o que é atribuído à incapacidade do penetrômetro em acompanhar as irregularidades dos poros pré-existentes no solo. Em geral, o valor de 2 MPa é aceito como sendo o limite acima do qual o crescimento radicular é prejudicado (Tormena, 1998; Imhoff, 2002). No entanto, este valor é muito variável entre as diferentes espécies vegetais e estádios de desenvolvimento das mesmas, bem como em função do tipo de solo. Assim, há evidências de que o crescimento radicular pode ser inibido em solos com RP inferior a 2 MPa. Taylor & Brar (1991) advertem, entretanto, que estudos em camadas de solo compactadas artificialmente desconsideram a existência de regiões de menor resistência por onde as raízes das plantas podem se desenvolver, bem como o fato de, durante o ciclo da cultura, as mesmas poderem experimentar períodos de menor resistência devido às flutuações de conteúdo de água.

Para Chancellor (1994), a principal vantagem da utilização da RP como indicativo do estado de compactação do solo refere-se à facilidade e rapidez de execução do ensaio, o qual, segundo Raper (2005), pode ser facilmente automatizado. Silva (2003) expõe também que o uso de penetrômetros permite a avaliação do estado de compactação em intervalos de profundidade relativamente pequenos, o que nem sempre é possível quando se utiliza outras propriedades. Além disso, a RP parece ser um indicador da qualidade estrutural do solo mais sensível a mudanças do manejo comparativamente à

densidade do solo, conforme comprovado em pesquisas como a conduzida por Abreu et al. (2004). A principal desvantagem da RP é a sua dependência em relação ao conteúdo de água, o que dificulta a comparação dos resultados obtidos em diferentes locais e épocas (Raper, 2005). A correção do índice de cone para um conteúdo de água comum, utilizando-se modelos matemáticos, constitui-se numa alternativa para superar esta dificuldade, conforme sugerido por Busscher et al. (1997).

A RP pode variar devido a diversos aspectos, entre eles: variação do conteúdo de água no solo, tipo de solo, conteúdo de matéria orgânica, agregação, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento (Horn & Lebert, 1994). Camargo & Alleoni (1997) ressaltam que sendo o aparelho operado manualmente, está passível de variações operacionais, visto a dificuldade de manter constante o curso e velocidade de penetração da haste.

Veen & Boone (1990), abordaram o crescimento de raízes de milho sob influência da resistência mecânica e do conteúdo de água no solo. Concluíram que o grau de crescimento das raízes primárias e adventícias foi afetado negativamente pela RP, mas o efeito do potencial da água foi positivo. Conforme aumenta a RP, diminui o comprimento de raízes e o seu diâmetro aumenta. Ressaltam ainda que a RP, assim como o conteúdo de água no solo influenciam diretamente o crescimento radicular. Essa relação não é linear, pois a taxa de crescimento radicular para uma determinada resistência é muito sensível quando o conteúdo de água no solo cresce a partir do valor de 0,1 MPa.

2.8. Variabilidade espacial em atributos químicos e físicos de solo e da resposta das culturas

A heterogeneidade é uma propriedade inerente do solo que tipifica sua anisotropia. Numa paisagem natural, o solo apresenta ampla variabilidade dos seus atributos no sentido espacial (Carvalho et al, 2003). O solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura. Por outro lado, os princípios básicos da experimentação, estabelecidos por meio do método estatístico clássico, consideram que a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória,

admitindo-se que seus atributos apresentem uma distribuição de frequência do tipo normal (Santos & Vasconcelos, 1987). Entretanto, vários estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial (Journel & Huijbregts, 1991), necessitando, portanto, de uma análise geoestatística. O conhecimento da distribuição de frequência dos dados de uma variável direciona o método estatístico a ser aplicado. Assim, a média aritmética é uma boa medida descritiva para dados com distribuição normal. No entanto, para a distribuição lognormal, deve-se utilizar a mediana (Oliveira et al., 1999). Por outro lado, o coeficiente de variação é uma medida adimensional da dispersão dos dados.

O conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala (Grego & Vieira, 2005). Experimentos de campo são, em sua maioria, divididos em parcelas ou áreas relativamente pequenas amostradas aleatoriamente. Contudo, ao considerar as parcelas experimentais uniformes quanto aos seus atributos, mesmo em pequenas áreas, pode-se interpretar erroneamente as respostas obtidas às questões existentes, pois a hipótese de ocorrência de dependência espacial estará sendo ignorada.

A variabilidade espacial do solo foi verificada em áreas de dimensões variadas, e detectou-se variabilidade suficiente para concluir que a amostragem ao acaso provavelmente esconderia a realidade (Grego & Vieira, 2005).

A análise geoestatística que permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas, constitui importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade das propriedades do solo (Carvalho et al., 2002; Vieira et al., 2002). Conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado, podem-se analisar os dados, possibilitando representar a área com maior detalhamento. O nível de detalhamento é obtido por meio da distância entre pontos de amostragem e depende tanto da propriedade a ser analisada, quanto da escala de trabalho (tamanho da área amostrada).

As propriedades físicas e hídricas do solo estudadas por diversos autores (Molin et al., 2003; Grego & Vieira, 2005; Molin et al., 2006; Timm, et al., 2011) variaram de um local para outro, apresentando continuidade ou

dependência espacial, dependendo do manejo adotado e das próprias características de origem dos solos. Solos manejados por diferentes preparos são alterados em profundidade e, principalmente neste caso, segundo Carvalho et al. (2002), a profundidade é um fator importante no estudo de dependência espacial.

A variabilidade espacial de atributos agronômicos é uma das linhas de estudo da agricultura de precisão (Molin, 1997). A geoestatística é a ferramenta mais utilizada para análise dos dados de variabilidade espacial e trata da avaliação da dependência espacial de variáveis regionalizadas. Um dos métodos da geoestatística para quantificação da dependência espacial, comuns em análises agronômicas, é a interpolação de dados amostrados pela krigagem pontual (Vicente, 2004). Este método consiste em uma sequência de etapas e foi resumido por Camargo et al., (2004): análise exploratória de dados; análise estrutural (modelagem da correlação espacial) e interpolação estatística.

A utilização da geoestatística permite identificar a existência ou não de dependência espacial entre as observações, podendo ser aplicada em mapeamentos, orientação de futuras amostragens e modelagens, permitindo, assim, estimar o valor do atributo em locais não amostrados, facilitando a gestão dos recursos naturais, especialmente em bacias hidrográficas representativas no contexto pedológico e de uso do solo.

Os trabalhos referentes a análise da variabilidade espacial, utilizando estes critérios, são largamente empregados na agronomia. No Brasil, atualmente, a variabilidade espacial de atributos de solo, visando à construção de zonas de manejo para adubação é uma técnica com cada vez maior difusão no meio agrícola (Molin, 2001, Molin, 2002). Porém, a correlação entre os mapas gerados pelo levantamento de análises do solo, frequentemente, não são indicativos eficientes da produtividade (Silva & Alexandre, 2005) ou do potencial produtivo ao longo do ciclo das culturas (Girma et al., 2006). Além disso, o trabalho de campo referente ao levantamento amostral é oneroso, necessitando grande número de amostras e sub-amostras para aquisição de resultados confiáveis (Molin, 2001).

Gomes et al., (2007) relatam coeficiente de variação (CV) de 61,28 % para condutividade hidráulica e estrutura de dependência espacial, assim

como, CV de 17 % para retenção de água. Estudos de variabilidade espacial da porosidade drenável em um solo de várzea, encontrando média variabilidade (CV) 43,8 %, além de fraca dependência espacial. Timm et al., (2011) estudaram a variabilidade temporal do armazenamento de água no solo em cultivo de café.

Estudos de variabilidade espacial da RP têm considerado a dependência desta variável com a qualidade do solo relacionada aos índices de carbono do solo e sua relação com a variabilidade espacial (Fidalski et al, 2006, Machado et al., 2009). Estudos de variabilidade espacial de RP foram desenvolvidos por Molin & Silva Junior, (2003), Grego & Vieira (2005) em sistemas de preparo convencional e em SPD por Abreu et al (2003) e Silva et al, (2004). Nos estudos desenvolvidos por esses autores demonstraram-se, através dos semivariogramas de RP, variações na continuidade espacial desse atributo nos sentidos vertical e horizontal.

Variáveis provenientes da interação solo-máquina não são comumente abordadas em termos de variabilidade espacial. A FT demandada por hastes sulcadoras foi medida e expressa em distribuição espacial por Molin & Adamchuk (2006) e no conjunto trator/semeadora-adubadora por Toledo et al., (2010).

Em muitos casos, buscou-se correlacionar a resposta espacializada das culturas com atributos físicos de solo e teor de argila (Molin & Silva Junior, 2003, Santos et al., 2005, Molin, et al., 2006, Molin, et al., 2007), e químicos de solo (Molin, et al., 2007, Filho et. al., 2010, Motomyia, et al., 2006, Junior et al., 2010, Júnior et al., 2010). Em outros casos, a população de plantas apresenta correlação melhor com a variabilidade da produção que os fatores químicos e físicos de solo (Vieira Junior, et al., 2006, Molin, et al., 2007). A variabilidade espacial no desempenho produtivo de culturas normalmente é abordada em conjunto com os atributos de solo. Diversas culturas aparecem na literatura fazendo parte de investigações com bases geoestatísticas. Dentre os trabalhos realizados no Brasil, é mais comum encontrar estudos envolvendo soja (Vieira et al., 2010), feijão (Santos et al., 2005) e milho (Vieira Junior, et al., 2006, Molin et. al, 2007). Filho et al., (2010) investigaram o comportamento espacial de soja, lablab, mamona, triticale, e milho pipoca.

Portanto, é possível se investigar muitas variáveis de solo e planta em sistemas agrícolas, e nos estudos já realizados, na maioria dos casos, encontra-se uma estrutura de dependência espacial para as mesmas. Desta forma, é possível se abordar sistemas produtivos na ótica da aplicação de agricultura de precisão, com mapeamento de diversos atributos a fim de melhor explicar, gerenciar e manejar o desempenho das diferentes culturas e fazer isso com bases científicas por meio da aplicação das ferramentas de geoestatística.

3 CAPÍTULO II. MOBILIZAÇÃO DE SOLO EM SEMEADURA DIRETA: ÍNDICE DE MOBILIZAÇÃO DE SOLO PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DE HASTES SULCADORAS DE SEMEADORAS

3.1 Introdução

O sistema plantio direto (SPD), é uma técnica onde a operação de semeadura das culturas é realizada em solo sem preparo prévio. Surgiu com o intuito de melhorar o manejo do solo, pois na ausência de preparo e com a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, foi possível reduzir substancialmente processos erosivos e promover melhorias em diversos atributos de solo, principalmente pelo aumento do carbono no solo (Bayer et al., 2002; Dieckow et al., 2009). Esta técnica vem sendo usada há pouco mais de 30 anos no Brasil, mas sua aplicação se difundiu substancialmente nas regiões Centro-Sul. Hoje, são cultivados no país mais de 27 milhões de hectares (Boddey, et al., 2010), fazendo do Brasil o segundo país em termos de utilização desta técnica, superado somente pelos Estados Unidos (Huggins & Reganold, 2008). Porém, no mundo todo, apenas cerca de 6% das terras são cultivadas sem preparo primário (Lal, 2007).

Para se realizar a semeadura em solo não mobilizado por preparos, faz-se necessário uma semeadora com dispositivos capazes de cortar os resíduos presentes sobre o solo, a fim de evitar o embuchamento e o acúmulo dos mesmos, assim como fazer a mobilização necessária na linha de semeadura para proporcionar condições adequadas às sementes, favorecendo a germinação das mesmas e o desenvolvimento das plantas (ASAE, 2005).

Máquinas semeadoras que atuam em solo sem preparo primário têm características estruturais distintas das destinadas a semear em solos mobilizados, principalmente no que se refere aos seus órgãos ativos. As partes componentes de semeadoras responsáveis pela mobilização de solo na linha de semeadura são os sulcadores e os discos de corte de resíduos. Os sulcadores promovem a maior parte da mobilização de solo e podem ser de diferentes tipos, mas os principais são as hastes sulcadoras e os discos duplos desencontrados. Comparando esses dois mecanismos de abertura de sulco, as hastes têm maior capacidade de mobilizar solo comparativamente aos discos duplos, devido principalmente à capacidade de atuar em maior profundidade (Silva, 2003; Bordignon, 2005). A demanda de tração em sulcadores do tipo haste supera a exigida pelos discos, resultando em maior consumo de combustível, menor velocidade de deslocamento do conjunto trator-semeadora e, conseqüentemente, menor capacidade de campo efetiva (Silva, 2003). Nesse sentido, a força necessária para tracionar uma ferramenta de preparo no solo advém do somatório de forças resultantes da passagem do sulcador através do solo, com corte, rompimento, deslocamento de solo e atrito solo-hastes (Hemmat & Adamchuk, 2008).

Apesar da menor capacidade operacional e maior demanda de potência e consumo de energia, os sulcadores do tipo haste têm sido utilizados em substituição aos discos duplos, como alternativa para o rompimento localizado de camadas compactadas de solo em superfície. Nesse sentido, Reis et al. (2006), trabalhando em um Latossolo argiloso, concluíram que a densidade do solo na linha de semeadura foi menor para as hastes sulcadoras em comparação aos discos duplos, o que resultou em uma maior porcentagem de emergência de plantas de milho para o primeiro mecanismo. Da mesma forma, Veiga et al. (2007) observaram que a mobilização na linha de semeadura por sulcadores do tipo haste reduziu a resistência mecânica do solo à penetração até a profundidade de 0,12 m, eliminando as diferenças observadas para esta variável entre o preparo convencional, a escarificação e o SPD.

A possibilidade de romper camadas compactadas de solo em superfície, ainda que de modo localizado, tem levado os produtores utilizar maiores profundidades de atuação das hastes, chegando, em alguns casos, a até 20 cm. No entanto, hastes com ponteiras estreitas, como as que equipam a maior

parte dos modelos de semeadoras-adubadoras adequadas à semeadura direta, apresentam uma capacidade limitada de atuar com eficiência quando se aumenta a profundidade de operação, devido às inter-relações da haste com o solo e ao comportamento de ruptura da estrutura do solo (Godwin & O'Dogherty, 2007; Hemmat & Adamchuk, 2008). Ao forçar hastes de ponteiros estreitas a operar profundamente, pode-se superar a chamada profundidade crítica de trabalho (O'Callaghan & McCullen, 1965, Godwin, 2007), a partir da qual ocorrem aumentos substanciais de demanda de força de tração (FT) sem um proporcional aumento na mobilização de solo. Com hastes operando em profundidades menores do que a profundidade crítica ocorre movimentação de solo em três direções, para frente, para cima e lateralmente (Godwin & O'Dogherty, 2007). De acordo com os mesmos autores, quando a profundidade de trabalho ultrapassa o valor referente à profundidade crítica, solo é deslocado predominantemente para frente e lateralmente, reduzindo, assim, a área fraturada da seção transversal do sulco e, conseqüentemente, o volume de solo mobilizado. Este fato torna-se relevante quando da aplicação de hastes sulcadoras com o propósito de melhorias na condição física do solo, em sistemas conduzidos sob SPD, pois determina a eficiência de trabalho dos sulcadores, tanto no que se refere à ação pretendida de mobilizar solo no sulco de semeadura, quanto ao dispêndio energético e capacidade operacional do conjunto trator-semeadora. Valores de referência para a profundidade crítica de trabalho de ferramentas de mobilização do solo do tipo haste podem ser obtidos a partir da relação profundidade de trabalho e largura da ponteira da haste. Em geral, a profundidade crítica equivale a 5 a 7 vezes a largura da ponteira (Godwin & O'Dogherty, 2007). O ângulo de ataque da haste (Godwin & O'Dogherty, 2007) e características do solo, tais como o conteúdo de água, o grau de compactação e o ângulo de atrito interno (Sánchez-Gijón, 1996), também interferem na forma de ruptura e mobilização de solo e, conseqüentemente, na profundidade crítica.

Para medir a eficiência na mobilização de solo por hastes sulcadoras, é preciso quantificar a mobilização de solo no sulco de semeadura, mensurando a área da seção transversal mobilizada. A área de solo mobilizada é considerada aquela porção de solo que é rompida e misturada pela passagem do mecanismo sulcador através do solo. Com a passagem do sulcador, parte

do solo é expulso do sulco, para um ou ambos os lados. Esse solo expulso do sulco e depositado sobre área não cisalhada pela passagem do sulcador não pode ser considerado área mobilizada, porque o solo e as raízes sob este não foram mobilizados (Fohlke et al., 2000). Obtendo-se a área mobilizada e a profundidade de sulcamento e sabendo-se o espaçamento entre as linhas de semeadura, pode-se calcular o volume de solo mobilizado, obtido para um dado comprimento de sulco ou área (m^2 ou hectares). Medindo-se a FT na haste sulcadora, torna-se possível determinar outro indicador da eficiência de mobilização do solo, a força de tração específica (FTE). Essa variável corresponde à FT média dividida pela área da seção de solo mobilizado no sulco. No momento em que a profundidade de operação da haste sulcadora ultrapassar a profundidade crítica de trabalho, espera-se que a FTE se eleve drasticamente. No entanto, acredita-se que esse parâmetro seja pouco eficiente, devido ao aumento exponencial da FT demandada com o incremento na profundidade de atuação (Godwin, 2007), e por existir uma elevada variabilidade na área da seção de solo mobilizado no sulco.

Diante disso, propõe-se, no presente trabalho, um novo indicador de eficiência de mobilização do solo por hastes sulcadoras, denominado de “Índice de Mobilização” (IM). O IM é obtido dividindo-se a área da seção transversal de solo mobilizado no sulco (cm^2) pela profundidade máxima de atuação da haste (cm). Neste caso, é melhor trabalhar com o centímetro como unidade básica, pois facilita a visualização, devido à escala submétrica em que ocorre este processo. Em outras palavras, o IM mostra quantos centímetros quadrados de seção de sulco são mobilizados para cada centímetro de profundidade de atuação. Quanto maior o IM, mais eficiente a haste em mobilizar o solo. Da mesma forma, valores constantes de IM em resposta ao aumento da profundidade de atuação da haste indicam que a profundidade crítica não foi atingida. A partir do momento em que a profundidade de trabalho torna-se maior do que a profundidade crítica ocorre redução dos valores do IM e a mobilização de solo é comprometida. Outra vantagem do IM relaciona-se ao fato de que, para a obtenção da FT, é preciso dispor de instrumentação eletrônica, o que nem sempre ocorre. Já a determinação da profundidade de atuação da haste, assim como da seção transversal de solo mobilizado no sulco de semeadura não exige instrumentos de elevado custo, necessitando

apenas de um perfilômetro de varetas (Debiasi, 2008; Conte et al., 2009).

Deste modo, esta pesquisa é baseada na hipótese de que o IM possa ser um novo indicador da eficiência de mobilização do solo por hastes sulcadores. Espera-se, assim, que haja diferenças nos valores do IM quando são comparados solos diferentes. Para o mesmo tipo de solo e perante uma mesma condição de manejo, supõe-se que, mediante a determinação do IM seja possível detectar a profundidade crítica de trabalho de hastes sulcadoras em função das diferenças na geometria das mesmas bem como das características e propriedades do solo.

O objetivo deste trabalho foi obter e validar a aplicação do IM como ferramenta de avaliação da eficiência de mobilização de solo por hastes sulcadoras em semeadoras, e comparar este índice com outros parâmetros de avaliação da mobilização de solo em semeadura direta, como a FTE.

3.2 Material e Métodos

Para a obtenção dos parâmetros necessários ao estudo, foram realizados diversos experimentos em distintas condições de solo, com diferentes modelos de hastes sulcadoras, atuando em diferentes profundidades nos anos 2006, 2007, 2008 e 2009. As avaliações que compõem este trabalho foram realizadas em duas condições de solo, cujas principais características físicas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas dos solos, na camada de 0 a 20 cm, determinadas conforme metodologias EMBRAPA (1997).

Característica analisada	Latossolo	Argissolo
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,35	1,71
Densidade de partícula (Mg m^{-3})	2,85	2,54
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,09	0,06
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,38	0,29
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,48	0,35
Limite de liquidez (kg^{-1})	0,38	0,23
Limite de plasticidade (kg kg^{-1})	0,26	0,14
Argila (kg kg^{-1})	0,54	0,27
Silte (kg kg^{-1})	0,27	0,22
Areia (kg kg^{-1})	0,19	0,51

3.2.1 Condição de Latossolo

A área experimental onde o estudo foi conduzido encontra-se instalada na Fazenda do Espinilho, localizada no município de São Miguel das Missões (29°03' de latitude sul e 53°50' de longitude oeste), região do Planalto do Rio Grande do Sul. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 2006), textura superficial argilosa, de origem basáltica. O relevo é ondulado a suavemente ondulado, com declividade variável entre 0,02 a 0,10 m m⁻¹. A área experimental vem sendo conduzida sob SPD desde 1994, sendo utilizada, até a safra 2000/01, para a produção de grãos com a cultura da soja (*Glycine max* L.) no verão e, no inverno, de sementes aveia preta (*Avena strigosa* Schreb). Desde o ano de 2001, adota-se o sistema integração lavoura-pecuária, mantendo a soja na primavera/verão e o consórcio de aveia e azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) para pastejo no outono/inverno. Neste solo, as avaliações relacionadas ao presente trabalho foram realizadas durante a semeadura da soja nos anos de 2006 a 2009.

3.2.2 Condição de Argissolo

A área experimental localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (30° 05' de latitude Sul e 51° 40' de longitude Oeste), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), textura superficial franco-argilo-arenosa com presença de cascalhos, de origem granítica. O relevo é suavemente ondulado, com declividade média de 0,03 m m⁻¹. O solo vem sendo usado em experimentos de campo, envolvendo diferentes sistemas rotação de culturas que englobam as culturas do milho, soja e feijão, no verão, e pousio ou plantas de cobertura (nabo forrageiro, aveia preta+azevém, aveia preta+ervilhaca e ervilhaca), no inverno. Os dados utilizados para este estudo, na condição de Argissolo, foram obtidos durante a semeadura da soja nos anos de 2005 a 2009, e representam uma média de diversas avaliações para as diferentes profundidades de operação das hastes sulcadoras, aqui apresentadas, com o

intuito de confrontar com as informações obtidas em Latossolo.

3.2.3 Instrumentação para medir força de tração

No ano 2006, na condição de Latossolo, e em todos os anos para o Argissolo, as avaliações referem-se às hastes montadas em uma semeadora-adubadora de cinco linhas, marca Vence Tudo, modelo 11500, com espaçamento entre linhas de 0,40 m, tracionada por trator da marca John Deere 5600, com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência máxima no motor de 53 kW (76 cv), à velocidade média de 5,6 km h⁻¹. As hastes sulcadoras apresentam largura da ponteira de 0,0257 m, ângulo de ataque no solo de 18° e comprimentos de 0,415; 0,440 e 0,475 m. Já para os dados de 2007, 2008 e 2009, em Latossolo, as hastes empregadas foram usadas numa semeadora-adubadora de oito linhas, marca Stara Sfil, modelo SS 8000, com espaçamento entre linhas de 45 cm, tracionado por um trator da marca CBT, modelo 2100, 4x2, com potência máxima no motor de 77 kW (105 cv), à velocidade de 4,5 km h⁻¹. Este modelo de haste é caracterizado por espessura da haste e da ponteira de 0,010 m e 0,02275 m, respectivamente, ângulo de ataque no solo de 20° e comprimento de 0,390; 0,410 e 0,440 m. A variação na profundidade de trabalho nos diferentes testes foi obtida não apenas com hastes sulcadoras de diferentes comprimentos, mas também por meio de ajustes na posição da haste em relação ao seu respectivo suporte .

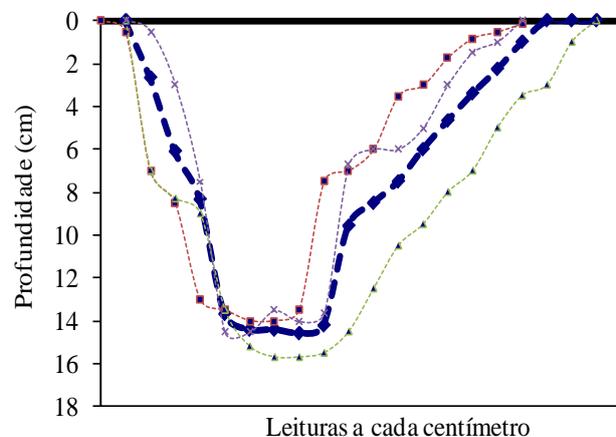
Para a medição dos valores de FT nas hastes (kgf), foram instalados, no suporte das mesmas, extensômetros de resistência elétrica (“strain gages”), capazes de medir a deformação ocorrida no suporte quando em operação, a qual é proporcional à força horizontal necessária para tracionar a haste. A aquisição de dados foi obtida com frequência de cinco leituras por segundo, sendo os mesmos armazenados por “datalogger” da marca Campbell Scientific, modelo CR23X. Maiores detalhes a respeito da instrumentação utilizada são apresentados por Cepik (2006) e Hemmat & Adamchuk (2008).

3.2.4 Avaliação do solo mobilizado na linha de semeadura

As medições necessárias para quantificar a mobilização de solo na linha de semeadura foram realizadas imediatamente após a passagem da semeadora, removendo-se cuidadosamente o solo mobilizado, de forma manual e com auxílio de uma espátula. Para obter o contorno do sulco exposto, utilizou-se um perfilômetro com largura total de 35 cm, composto por varetas espaçadas de 1 cm, e que podem ser deslocadas verticalmente em 30 cm (Figura 1a). Para cada local de avaliação, removeu-se o solo de aproximadamente um metro de sulco, onde foram feitas três medições com o perfilômetro, compondo uma amostra. As subamostras se fazem necessárias devido à alta variabilidade apresentada por essa variável. Para se obter as leituras, após a exposição do sulco, o perfilômetro foi posicionado transversalmente sobre o mesmo. Em seguida, as varetas do perfilômetro foram liberadas. O posicionamento da extremidade superior das varetas copia a forma geométrica do sulco, permitindo transcrevê-lo a uma folha de papel colocada à frente do painel do aparelho. A maior distância vertical medida entre o fundo do sulco e a superfície do solo correspondeu à profundidade máxima do mesmo. As distâncias verticais de cada ponto copiado do fundo do sulco, em relação à linha correspondente à superfície do solo, foram medidas no laboratório e, através de uma planilha eletrônica elaborada no Microsoft Excel[®], obteve-se a área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, em cm², resultante da integral dos valores de profundidade, na largura do sulco (Figura 1b). Pela razão entre área de solo mobilizada e profundidade máxima do sulco calculou-se o índice de mobilização (IM).



a



b

Figura 1. Perfilômetro de varetas (a) e representação gráfica do perfil obtido, leituras e média (b).

3.3 Resultados e Discussão

A FT medida em hastes sulcadoras ou qualquer outro equipamento que é tracionado através do solo, e representa a força horizontal necessária para romper e mobilizar a estrutura e a massa de solo, respectivamente, no sulco (Hemmat & Adamchuk, 2008). A FT sofre incrementos substanciais com pequenas alterações na profundidade de trabalho, e isso fica bem claro quando se observa a FT demandada por hastes operando em três profundidades (Figura 2) na condição Latossolo, corroborando com Godwin (2007). No exemplo ilustrado pela Figura 2, têm-se três hastes idênticas quanto à geometria, operando a 6, 9 e 12 cm em Latossolo, sobre pastagem de aveia preta mais azevém, imediatamente após o período de pastejo. Antecede as hastes sulcadoras na semeadora, um disco de corte que, além de segmentar os resíduos, cisalha o solo previamente à passagem da haste e, com isso, diminui a FT requerida na haste em até 40% conforme demonstrado por Bordignon (2005). É importante salientar que os dados de FT aqui apresentados referem-se somente àquela demandada pela haste sulcadora. Para se obter a FT total necessária para cada unidade de semeadura (linha), dever-se-ia adicionar a FT no disco de corte e as forças de atrito que promovem a resistência ao rolamento do conjunto. Para fins de avaliação de sistemas agrícolas, a FT demandada pela haste vem sendo usada no mapeamento da variabilidade espacial do estado de compactação do solo, conforme proposto por Bergeijk et al. (2001) e realizado nos trabalhos de Herzog et al. (2004), Cepik et al. (2005) e Conte et al. (2007), pois essa variável apresenta boa correlação com atributos físicos como a resistência mecânica do solo à penetração (Hanquet et al., 2004; Conte et al., 2008).

A variabilidade nos dados de FT (Figura 2) é resultante da interação solo-haste, e o particular modo de falha/rompimento do solo, associado a diferenças de conteúdo de água, textura e compactação, conforme explicam Hayhoe et al. (2002). Isto tem uma implicação prática, pois quando se quer trabalhar com essa variável, torna-se necessária uma alta frequência de aquisição de dados, para que os resultados obtidos de fato representem a realidade de campo. Ao usar a FT para se obter outras variáveis, como é o

caso da FTE, obtida pela razão entre FT média e área média da seção transversal de solo mobilizado no sulco, é importante dispor de um número considerável de valores de FT, e assim reduzir a variabilidade nessa informação.

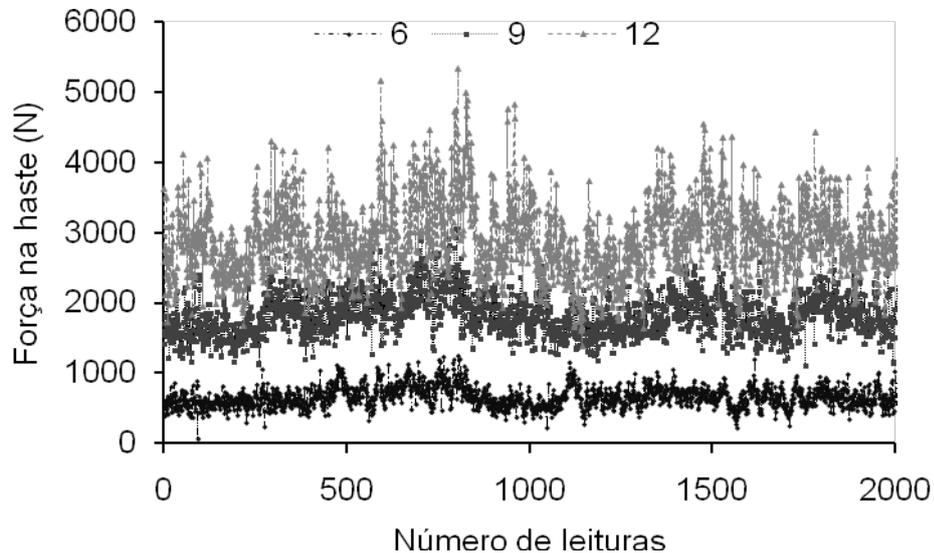


Figura 2. Força de tração medida na haste sulcadora (N), em função da profundidade de operação, em Latossolo.

A FTE pode ser um bom indicador de desempenho de hastes sulcadoras quanto ao dispêndio energético e de potência, e muito eficiente ao comparar diferentes modelos de hastes operando a uma mesma profundidade. Por meio desta, é possível avaliar o efeito de parâmetros construtivos das hastes e a implicação na quantidade de solo mobilizado e FT requerida. Já quando se deseja avaliar eficiência na mobilização de solo, comparando modelos de hastes capazes de operar a diferentes profundidades, deve-se levar em consideração que o aumento da FT não é proporcional à profundidade de operação, conforme comprovado pelos dados da Figura 2. Dessa forma, a FTE normalmente se eleva com o aumento na profundidade de atuação, o que é confirmado pelos dados mostrados na Figura 3. Nesta Figura, é importante comparar valores de FTE obtidos na mesma ocasião, identificada pelos anos. Em cada ano, as avaliações foram realizadas sob diferentes conteúdos de água, fator este que interfere nas forças de adesão, coesão e atritos entre solo e metal (Sánchez-Girón, 1996) e, com isso, altera a demanda de FT bem como o padrão de mobilização do solo no sulco de semeadura. O conteúdo de água gravimétrica no solo nos diferentes anos de avaliação (2006, 2007, 2008 e

2009) foram 0,170, 0,240, 0,210 e 0,260 kg Kg⁻¹, respectivamente. Nota-se que, para uma mesma ocasião de amostragem, representadas pelos anos, a FTE aumentou em função do incremento na profundidade de atuação das hastes sulcadoras. Sendo assim, percebe-se que a FTE não é um bom indicador de eficiência de mobilização do solo em função da profundidade de atuação de hastes sulcadores, em sulcos de semeadura em SPD.

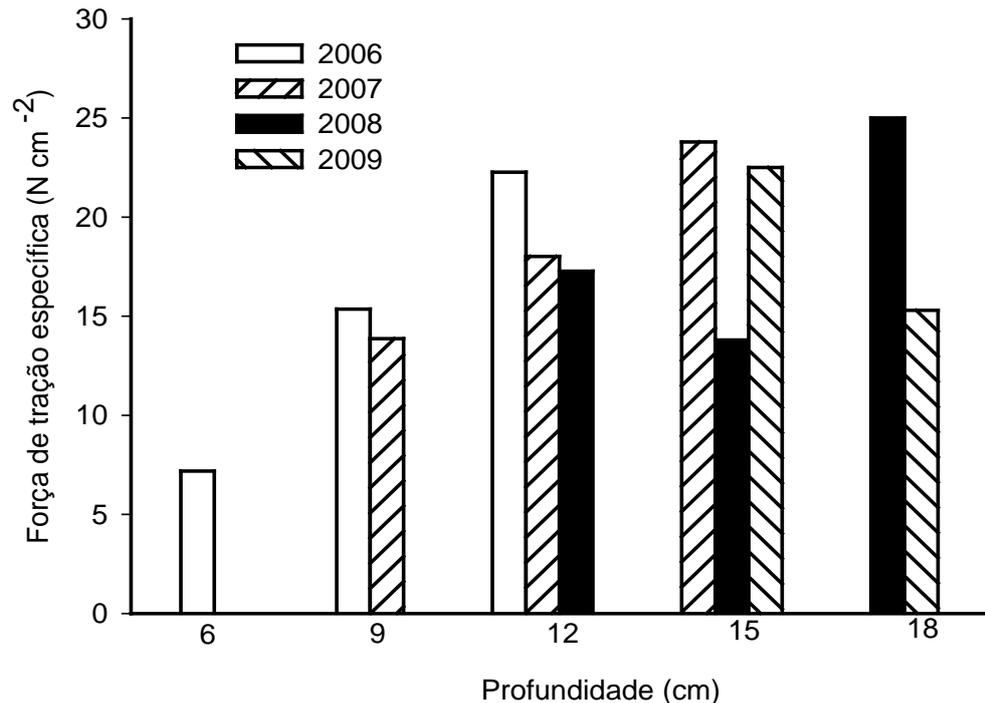


Figura 3. Força de tração específica em diferentes ocasiões de amostragem e profundidades de regulagem da haste sulcadora, em Latossolo.

Dessa forma, faz-se necessário mensurar a mobilização de solo em relação à profundidade de trabalho da haste. Quantificando-se a área de solo mobilizado, e dividindo-a por um fator fixo, a profundidade de atuação da haste, obtém-se o Índice de Mobilização - IM (Figura 4). Por meio do IM, é possível avaliar se as hastes sulcadoras, quando reguladas para operar em profundidades crescentes, mantêm sua eficiência em mobilizar solo. Caso os valores do IM se mantiverem constantes à medida que as hastes operam mais profundamente, têm-se eficiência na mobilização. Por outro lado, uma redução na magnitude do IM indica perda de eficiência de mobilização. Essa avaliação se faz necessária, pois devido à espessura das ponteiros empregadas, pelo

conceito se atingiria a profundidade crítica em hastes operando em torno de 15 cm de profundidade.

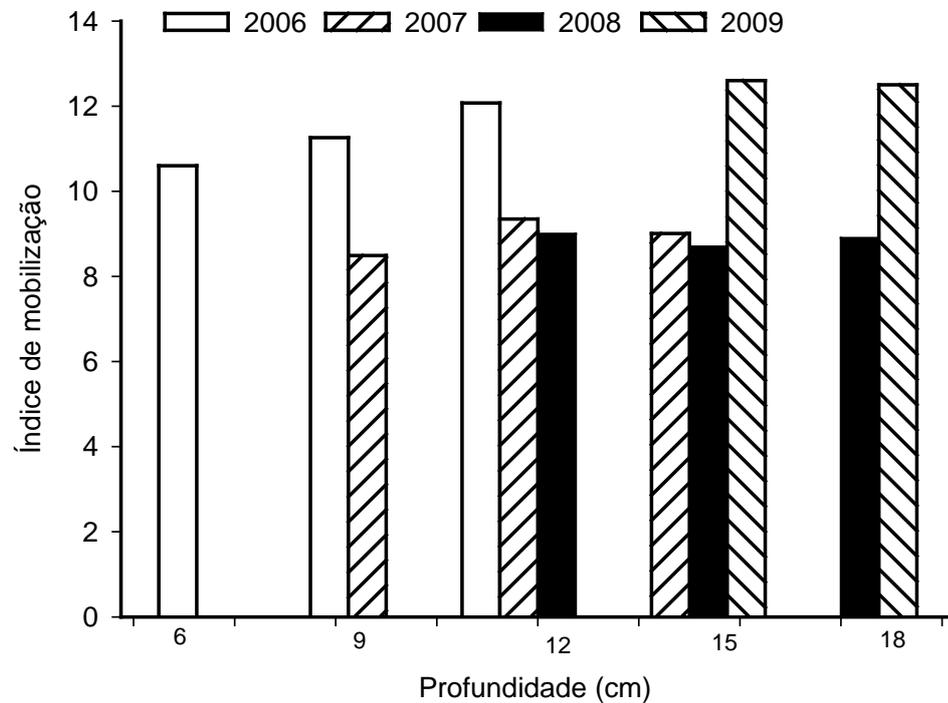


Figura 4. Índice de Mobilização de solo em semeadura direta em função dos anos de amostragem e profundidade de sulcamento, em Latossolo.

A variação da FTE e do IM em função da profundidade de atuação das hastes sulcadoras, para o Latossolo e o Argissolo, é mostrada nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Para o Latossolo (Figura 5), observa-se que, enquanto a FTE aumenta com o incremento na profundidade de trabalho das hastes sulcadoras, os valores do IM mantêm-se constantes. Esse resultado demonstra que, para o Latossolo, as hastes sulcadoras utilizadas foram eficientes em termos de mobilização do solo mesmo quando atuaram a uma profundidade de 18 cm. O mesmo não ocorreu para as hastes operando em Argissolo (Figura 6). Neste caso, observa-se que o IM aumentou até as hastes atingirem 12 cm de profundidade. A partir desta, o IM passou a diminuir com o aumento da profundidade de atuação das hastes. Desse modo, pode-se afirmar que, para o Argissolo, a profundidade de atuação que resultou na maior eficiência de mobilização correspondeu a 12 cm.

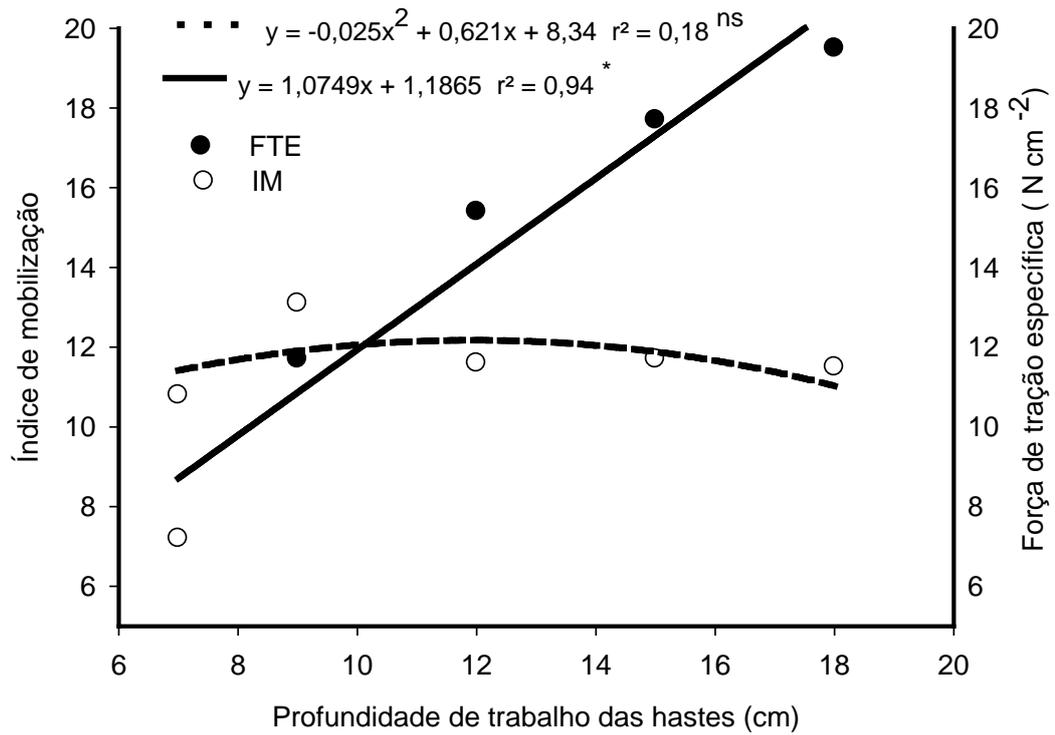


Figura 5. Índice de Mobilização (IM) e Força de Tração Específica (FTE) em função das profundidades de atuação das hastes da semeadora, em Latossolo.

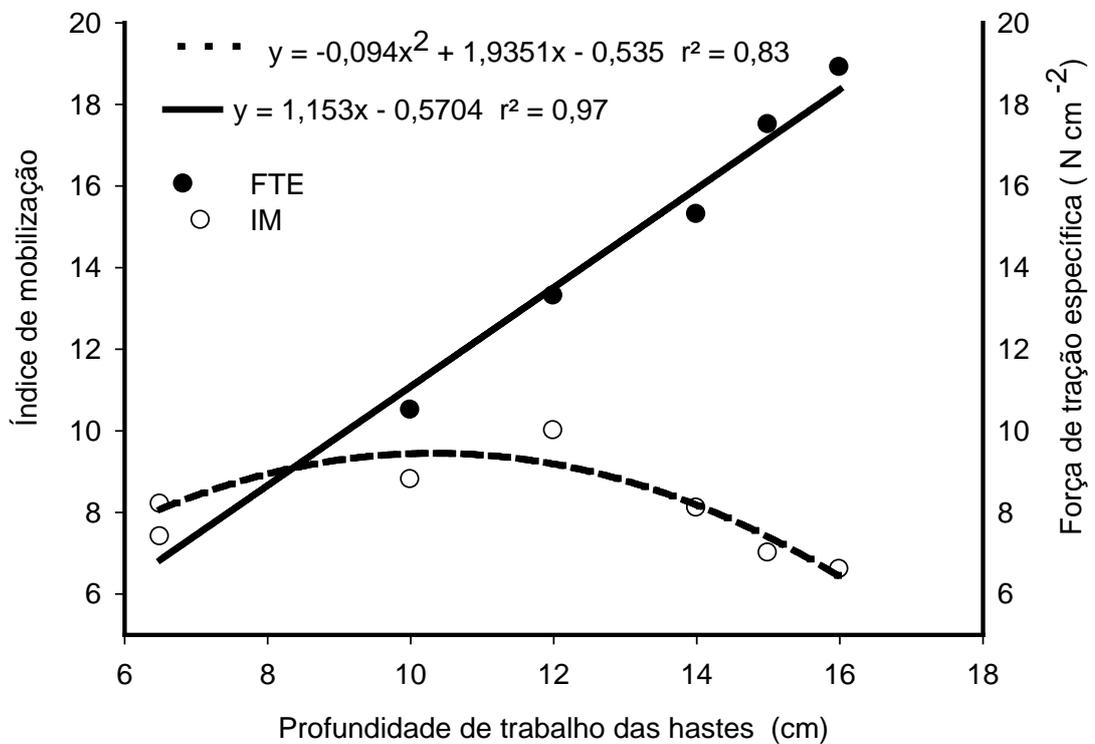


Figura 6. Índice de Mobilização (IM) e Força de Tração Específica (FTE), em função das profundidades de atuação das hastes da semeadora, em Argissolo.

Ao comparar os solos estudados (Figura 7), percebe-se que os valores do IM foram maiores para o Latossolo comparativamente ao Argissolo. Esse comportamento pode ser explicado levando-se em consideração as diferenças observadas entre os dois solos no que se refere aos parâmetros que compõe a equação de Coulomb (coesão e ângulo de atrito interno), a qual determina a resistência do solo à ruptura pela ação de uma ferramenta de preparo. Os Latossolos são mais fortemente estruturados, em função da textura e mineralogia, com mais elevado conteúdo de argila e óxidos de ferro e alumínio, que promovem agregação mais intensa. Nessa situação, a coesão do solo é maior (Sanchez-Girón, 1996). De acordo com Godwin & O'Dogherty (2007), solos com baixa coesão tendem simplesmente a fluir lateralmente às ferramentas do tipo haste, ou seja, tendem a uma ruptura bidimensional. Isso significa que, em solos arenosos, como o Argissolo estudado (Tabela 1), a área de solo mobilizado tende a ser menor comparativamente a um solo argiloso e fortemente estruturado, como é o caso do Latossolo. Por outro lado, Godwin & O'Dogherty (2007) explicam que, para um mesmo valor de coesão, a mobilização do solo tende a ser maior em solos com maior ângulo de atrito interno. Essa variável atinge maiores magnitudes para partículas de maior dureza, rugosidade e tamanho (Braidá, 2004). No Latossolo, provavelmente, o cisalhamento do solo ocorreu seguindo os planos de fraqueza entre os agregados. Assim, o atrito se deu entre os agregados e não entre as partículas primárias do solo, de modo que, possivelmente, o ângulo de atrito interno tenha sido maior também para o Latossolo. Resultado similar foi observado por Braidá (2004) que estudando a resistência ao cisalhamento de Latossolos e Argissolos, concluiu que, sob tensões normais inferiores à resistência dos agregados, o ângulo de atrito interno de Latossolos argilosos pode ser tão grande ou maior do que o de Argissolos arenosos.

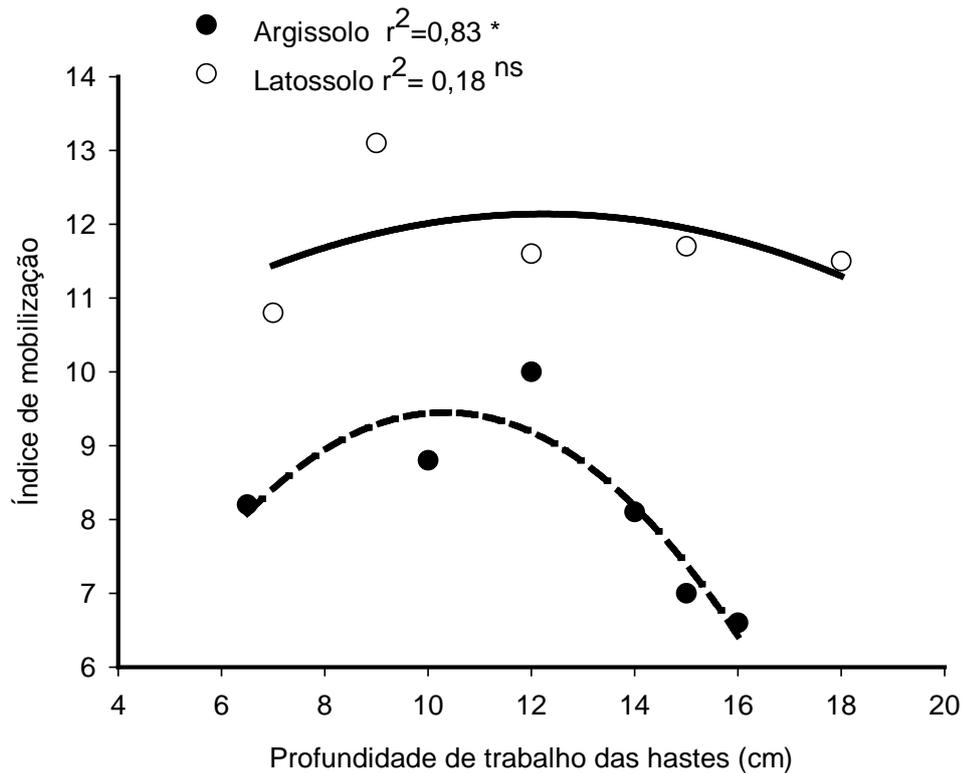


Figura 7. Índice de mobilização, obtidos em função da profundidade de atuação das hastes da semeadora, para a condição de Latossolo e Argissolo.

3.4 Conclusões

1. Ao contrário da FTE, o IM mostrou ser uma ferramenta eficaz para avaliar a eficiência de hastes sulcadoras de semeadoras em mobilizar solo na linha de semeadura, à medida que se exige das mesmas operar em profundidades crescentes.

2. O IM foi sensível em detectar alterações na eficiência de mobilização do solo por hastes sulcadoras em virtude das classes de solo estudadas (Argissolo e Latossolo). A eficiência de mobilização, medida pelo IM, foi menor para o Argissolo comparativamente ao Latossolo. Para o Argissolo, a maior eficiência de mobilização ocorreu quando a haste atuou a 12 cm de profundidade, enquanto que, para o Latossolo, esse valor não foi claramente identificado até a profundidade de 18 cm.

4. CAPÍTULO III. MOBILIZAÇÃO DE SOLO EM SEMEADURA DIRETA: INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE NO ÍNDICE DE MOBILIZAÇÃO

4.1 Introdução

Diversos fatores controlados pela ação do homem podem exercer influência sobre atributos físicos do solo, principalmente na camada superficial. Dentre os principais pode-se destacar a aplicação de pressões por tráfego de máquinas e animais, que podem agir no sentido de causar danos à estrutura física do solo. Em contrapartida, o cultivo de plantas de cobertura e a adição de biomassa ao solo promovem incrementos na matéria orgânica e esta atua diretamente na agregação do solo, juntamente com o sistema radicular.

As propriedades e características físicas do solo são de fundamental importância dentro dos sistemas de produção agropecuários, interferindo diretamente no crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas (Imhoff, 2002).

As atividades agrícolas administradas pelo homem podem impor ao solo, variáveis capazes de causar alterações nos parâmetros físicos, principalmente na densidade e estruturação, interferindo diretamente na porosidade, condutividade hidráulica e de gases, armazenamento de água e resistência da estrutura do solo. Atualmente, uma das maiores preocupações no uso do solo se refere à compactação, advinda da aplicação de pressões ao solo, incapazes

de serem suportadas pela sua estrutura, resultando em alteração da mesma com aumento de densidade e redução de espaço poroso (Debiasi et al. 2008).

Na tentativa de reverter esse quadro utiliza-se o preparo de solo, que rompe a estrutura do solo pela ação mecânica dos componentes ativos das máquinas. No entanto, em sistemas SPD não se pode contar com essa alternativa, e o que resta como estratégia é o uso de semeadoras equipadas com hastes sulcadoras, capazes de fazer um preparo localizado na linha de semeadura (Conte et al., 2009).

A mobilização de solo onde a estrutura está compactada gera blocos massivos, diferentemente de quando se desagrega um solo estruturado, com quebra nos planos de fraqueza. Com isso variáveis relacionadas à mobilização de solo pela ação de implementos são alteradas, principalmente no que se refere à hastes sulcadoras de semeadoras, por realizarem uma ação localizada na linha de semeadura, ao contrário de implementos de preparo de solo, que mobilizam toda a camada superficial. Nesse contexto ressalta a importância em se dispor de meios de avaliar a eficiência de hastes sulcadoras na mobilização de solo, perante diferentes condições de superfície, e para isso é possível usar variáveis como a força de tração específica (Conte et al., 2009) ou o Índice de Mobilização de solo (IM), que se refere diretamente à eficiência de mobilização de solo por hastes sulcadoras.

Entre as principais causas da compactação de solo têm-se o tráfego de máquinas agrícolas e de animais, (Botta et al., 2006). Na agricultura moderna, as máquinas fazem parte das operações agrícolas e trafegam sobre o solo por diversas ocasiões durante um ano agrícola. A fim de amenizar os impactos causados por estas, deve-se observar o conteúdo de água do solo no momento das operações. O pisoteio por animais também tem potencial de causar degradação da estrutura do solo, por aplicar pressões ao solo sob seus cascos, superiores até mesmo às aplicadas por pneus agrícolas (Greenwood & McKenzie, 2001). Mas a presença de animais em áreas agrícolas somente ocorre naquelas onde adota-se o sistema de integração lavoura-pecuária.

O efeito obtido do tráfego de máquinas agrícola, além de ser influenciado pelo conteúdo de água do solo (Debiasi, et al., 2008), também exerce ação sobre as forças que unem as partículas do solo, é extremamente dependente da pressão aplicada sob os pneus. Esta pressão advém da massa

incidente sobre os rodados e da área de contato destes com o solo. Dessa forma, a alteração do tamanho de rodados e área de contato é uma estratégia para manejar as pressões exercidas no campo. Outro problema relacionado à compactação por tráfego de máquinas refere-se à profundidade de aplicação das pressões, que podem se estender além da profundidade capaz de ser atingida por hastes sulcadoras de semeadoras (Jorajuría Collazo, 2005).

A ação compactante exercida por animais está relacionada à quantidade de animais por área ou por unidade de forragem, denominada de intensidade de pastejo. Quanto maior a intensidade de pastejo, maior a ação negativa do pisoteio sobre o solo, por serem mais animais sobre determinada área, resultando em maior pressão aplicada (Flores, et al., 2007). Mas elevação na intensidade de pastejo também acarreta maior deslocamento e tempo em pastejo dos animais (Baggio et al., 2008), o que incrementa ainda mais o pisoteio animal. Diferentes intensidades de pastejo podem promover alterações na densidade do solo, principalmente na camada superficial (Flores, et al., 2007), na resistência mecânica do solo à penetração (Conte et al., 2008) e também na estrutura do solo, com alteração no diâmetro médio de agregados (Souza, et al., 2009). Outro efeito direto da intensidade de pastejo é no residual da pastagem, representado pela forragem não consumida e que acaba sobre o solo, exercendo influência sobre as trocas de água com a atmosfera, conforme Taboada et al. (2006) e diagnosticado por Conte et al. (2008), com redução do conteúdo de água gravimétrica na presença de menor cobertura de solo, assim como nas alterações dos atributos físicos de solo (Silva et al., 2003). Também, nesse sentido, intensidades de pastejo promovem diferentes quantidades de massa de raízes sob a pastagem (Conte 2007, Souza, et al., 2008) e com isso aumentando o efeito sobre a estruturação e agregação do solo.

A contribuição do sistema radicular das plantas na agregação do solo é um fato consolidado, e ocorre pela aproximação de partículas e agregados menores devido ao efeito físico de raízes (Dexter, 1991), contribuindo para a formação da estrutura do solo (Debiasi, 2008, Tomazi, 2008). Desta forma, pode-se ter um efeito distinto no solo, com diferentes plantas de cobertura e culturas implantadas, devido à diferenças no sistema radicular. As diferenças quanto ao sistema radicular das culturas ocorrem na arquitetura, como é o caso na comparação de gramíneas, com sistema radicular fasciculado e

leguminosas, com raízes pivotantes. Mas diferenças no sistema radicular também ocorrem no sentido de profundidade alcançada, densidade e diâmetro de raízes, tempo de permanência no solo (plantas perenes ou anuais) ou tempo de reciclagem. Em sistema com pastagem de gramíneas, mais de 90% dos agregados apresentaram diâmetro maior que 2 mm (Salton et al., 2008), demonstrando a capacidade desse tipo de sistema radicular atuar na agregação do solo. As gramíneas perenes, por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição no solo, favorecem o contato entre partículas minerais e, assim contribuem para formação e estabilidade de agregados, (Silva & Mielniczuk, 1997). A consorciação de gramíneas e leguminosas é mais eficiente na agregação do que somente leguminosas ou gramíneas (Allison, 1973).

O sistema radicular das plantas atua na formação de bioporos (Dexter, 1991), pois quando da morte e ciclagem das raízes, remanesce, o espaço ocupado por eles (Oades, 1993), servindo como um canal de condução de água e nutrientes, atuando nas trocas gasosas ou ainda sendo reutilizado por novas raízes. As raízes no solo interagem com ferramentas de preparo de solo, dando maior resistência ao rompimento da estrutura. Ainda podem aderir ou ficarem enroscadas em hastes sulcadoras de semeadoras, alterando as dimensões da mesma e conseqüentemente o trabalho de mobilização de solo (Mac Laughlin, et al. 2004, Bortolloto et al., 2006).

Assim como apresentam diferenças no sistema radicular, plantas de cobertura de solo têm diferentes capacidades de produzir biomassa, alterando a quantidade de carbono que entra no sistema, e conseqüentemente, o teor de matéria orgânica do solo, que é o principal agente de agregação (Tomazi, 2008).

A adição de matéria orgânica via plantas de cobertura é outra medida que, a médio e longo prazo, tende a melhorar a qualidade física do solo para o desenvolvimento das culturas. A matéria orgânica é um dos principais agentes cimentantes que atuam na formação e estabilização dos agregados (Bayer & Mielniczuk, 1999; Silva et al., 2004). Neste sentido, Dexter (1988) afirma que solos agregados se caracterizam por uma maior porosidade total, especialmente no que se refere aos macroporos, e por uma menor densidade e resistência mecânica à penetração.

Deste modo, tem-se como hipótese que ocorrem diferenças no IM quando são comparados solos diferentes e formas de manejo aplicadas ao mesmo, em função das mudanças nos atributos físicos de solo proporcionadas por plantas de cobertura, condições de tráfego de máquinas, quantidade de resíduos sobre o solo e diferentes intensidades de pastejo e pisoteio animal, em sistema de integração lavoura-pecuária.

Estudou-se o efeito de intensidades de pastejo, em Latossolo, e do o tráfego de máquinas, assim com das plantas de cobertura de solo e diferentes adições de biomassa vegetal, em Argissolo, sobre o Índice de Mobilização de solo (IM).

4.2 Material e Métodos

As avaliações referentes a este trabalho foram realizadas em duas condições de solo: Latossolo e Argissolo.

4.2.1 Condição de Latossolo

Detalhamentos deste solo, local de avaliação, histórico de uso e atributos físicos são apresentados no Capítulo 2, itens 3.2.1 e 3.2.3.

O experimento engloba uma área de 21,3 ha, divididos em 14 parcelas de diferentes tamanhos, arranjadas no delineamento experimental de blocos inteiramente casualizados, com três repetições, exceto para o tratamento sem pastejo que só apresenta duas repetições. Os tratamentos constaram de quatro intensidades de pastejo representadas por alturas de manutenção da pastagem (10; 20; 30; e 40 cm), e uma testemunha sem pastejo (SP). Foram utilizados animais-teste fixos nas parcelas, juntamente com um número variável de animais reguladores. Estes foram adicionados ou retirados das referidas parcelas visando à manutenção das alturas de pastejo propostas, em pastejo contínuo e lotação variável. Para os tratamentos, caracterizados pelas referidas alturas (10; 20; 30; e 40 cm), na média dos oito anos de avaliação, comportou 1930, 960, 573 e 353 kg peso vivo ha⁻¹, respectivamente. O período de pastejo estendeu-se de meados de julho a meados de novembro, representando cerca

de 120 dias de permanência dos animais sobre a pastagem, em sistema de pastejo contínuo.

4.2.2 Condição de Argissolo

Os estudos foram desenvolvidos num Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), com origem granítica. A área experimental localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (Lat. S 30° 05` e Long. O 51° 40`), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. A textura superficial deste solo é franco-argilo-arenosa, com a presença de cascalhos. O solo vem sendo usado em experimentação de campo, com rotação de culturas. Para a finalidade deste estudo, foram avaliadas diferentes áreas experimentais, com distintas condições de superfície, proporcionadas por fatores como a quantidade de resíduos presentes, condições de tráfego de máquinas agrícolas e diferentes plantas de cobertura de solo.

As avaliações realizadas sobre a influência da quantidade de resíduos no IM foram obtidas em uma área experimental que está sendo conduzida desde o ano de 2000 na condição de doses crescentes de resíduos dispostos sobre a superfície em semeadura direta. Os tratamentos englobam seis doses de resíduos de aveia preta, ou aveia preta consorciada com ervilhaca, dependendo da cultura sucessora de verão, no momento da semeadura desta: zero, 2, 4, 5, 6 e 8 Mg ha⁻¹. Antecedendo a semeadura de verão, as plantas de cobertura são dessecadas, e após a palha da secar, são colhidas. Na colheita, a palha proveniente do sacas-palha e das peneiras da colhedora foi coletada com auxílio de uma lona plástica e, após a pesagem da quantidade necessária em cada parcela, as doses de resíduo foram uniformemente distribuídas sobre as mesmas, assim obtendo-se os tratamentos. O tratamento com quantidade zero é mantido sem plantas no período em que cresce a cultura nos demais, com aplicação de herbicida de ação total sempre que necessário.

Para abordar as condições de tráfego de máquinas e a sua influência sobre o IM, foram utilizados dados de dois experimentos implantados para se obter área trafegada e não trafegada por pneus em SPD. Para isso usaram-se parcelas onde a passagem do trator é delimitada pela marcação da mesma

(estacas), não permitindo transitar fora dessa faixa definida, e com isso obtendo-se zonas trafegadas e não trafegadas, com acúmulo desse efeito ao longo dos anos. As duas áreas estudadas para essa condição foram implantadas no ano de 2001, e com isso, tem-se o efeito destas condições de tráfego acumulado por oito anos. O tráfego aqui citado refere-se a um trator 4x2 TDA, com massa de 3.835kg, pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1, com pressão de inflação foi de 95 e 110 kPa, e a pressão de contato com o solo de 115 e 120 kPa, respectivamente quando em operação de semeadura.

O outro fator abordado com suposta influência sobre o IM é relativo às plantas de cobertura de solo, cultivadas no período de outono-inverno, antecedendo às culturas de verão, com o propósito de deixar sobre o solo seus resíduos e visando o benefício proporcionado ao solo e sua estrutura física. As avaliações foram realizadas em três áreas experimentais, sendo que em todas adota-se o sistema de rotação de culturas em SPD, e com isso tem-se nos anos sucessivos diferentes plantas de cobertura e também culturas de verão. Em duas das áreas avaliadas o sistema restringe-se ao cultivo de soja e milho no verão, e com isso tendo aveia consorciada com ervilhaca ou então nabo forrageiro antecedendo o milho, e aveia preta antes da soja. Na outra área, têm sido adotadas três culturas no verão: soja, milho e feijão, mas com o cuidado de não ter sequência de leguminosas, com isso o milho entra a cada dois anos no sistema.

4.2.3 Avaliação da quantidade de solo mobilizado

Diante das diferentes condições de superfície do solo, tráfego de rodados, quantidade de resíduos e plantas de cobertura, abordadas nesse estudo, as avaliações voltaram-se para investigação da mobilização de solo proporcionada pelas hastes sulcadoras da semeadora, no momento da semeadura direta, atuando em diferentes profundidades. Para isso, avaliou-se a quantidade de solo mobilizado, medindo-se a seção transversal do sulco, com auxílio de um penetrômetro de varetas (Figura), e com isso obtendo-se a área da seção transversal do sulco e a profundidade máxima atingida, dentro de cada profundidade de trabalho definida por meio da regulagem, item 3.2.3,

Capítulo 2. Dispondo dos dados de área de sulco e profundidade máxima de atuação obteve-se o Índice de Mobilização de solo (IM), pela razão da área pela profundidade.

O número de repetições usadas para cada tratamento, dentro de uma profundidade de atuação da haste sulcadora e nas diversas condições de superfície (tráfego, quantidade de resíduo e plantas de cobertura), foi variável, visto que os dados foram obtidos de diversos estudos conduzidos nos últimos nove anos para a condição de Argissolo, e por isso nem sempre foram obtidos dados para todas as profundidades de atuação, numa mesma ocasião. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e havendo significância para o teste, foram comparadas as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. Foram comparadas as médias obtidas para os distintos tratamentos dentro de cada profundidade de atuação da haste sulcadora, e a média do IM para as profundidades de operação da haste.

4.3 Resultados e Discussão

Ao analisar o IM em função da presença ou ausência de tráfego de máquinas agrícolas (Tabela 2), foi encontrada diferença significativa ($P < 0,05$) somente quando a haste sulcadora operou na profundidade de 9 cm. Mas apesar de apresentar diferença significativa para o IM somente nessa profundidade, percebe-se que na média, o IM é menor sob a influência de tráfego agrícola. De certa forma esse é um comportamento esperado, visto que sob aplicação de pressões de pneus o solo pode ser compactado (Kamimura et al. 2009), e com isso diminui a área e volume mobilizado (Conte et al. 2009) quando da ação de uma ferramenta que realiza preparo localizado, como é o caso de hastes sulcadoras em SPD, tendo como consequência ainda, elevação na força de tração, conforme Cepik et al., (2005). Na média das profundidades testadas, hastes que operaram em profundidades intermediárias (9, 12 e 15 cm) apresentaram maior IM do que a 6 e 16 cm. Desta forma comprova-se que a profundidade crítica de atuação para hastes sulcadoras encontrase entre as profundidades 12 e 15 cm. Se os dados não forem submetidos à comparação de médias, e sim plotados numa curva, a inflexão da mesma ocorre a 12 cm, o que de fato foi demonstrado na Figura 7 do capítulo 2.

Tabela 2. Índice de mobilização de solo (IM) em função do tráfego de rodados de tratores e das profundidades de atuação da haste sulcadora, em Argissolo.

Condição de Tráfego	Profundidades da haste (cm)					Média
	6	9	12	15	16	
 IM					
Sem	7,1	9,1a	8,9	8,0	6,7	8,0 a
Com	6,7	6,9 b	8,1	7,9	6,5	7,2 b
Média	6,9 B	8,0 A	8,6 A	8,0 A	6,6 B	7,6
CV %	11,5	8,3	15,1	11,7	6,8	

Médias seguidas de letras diferentes, minúsculas nas colunas e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey, $p < 0,05$, e ausência de letras após as médias indica não significância na análise de variância.

Ainda no que se refere ao comportamento do solo que tenha sofrido aplicação de pressões ao solo, foi estudado o comportamento do IM perante diferentes intensidades de pastejo (Tabela 3), monitoradas por meio da altura da pastagem. Os tratamentos abordados nesse caso estão sob influência de quantidades crescentes de animais por área, assim como do caminhamento exercido pelos mesmos em busca da forragem, visto a diminuição da oferta nessa ordem. Sendo assim, esperava-se um efeito similar ao que ocorreu com o tráfego de máquinas. Mas nesse caso, maior número de animais por área e mais tempo de caminhamento (Baggio et al., 2009) não resultou um efeito claro sobre a mobilização de solo por hastes sulcadoras, expresso por meio do IM, com exceção do efeito encontrado nas profundidades de 6 e 18 cm. Na menor profundidade de atuação (6 cm) encontrou-se maior IM para a ausência de pastejo ou maiores alturas da pastagem (30 e 40 cm). Possivelmente as diferenças encontradas nessa profundidade de atuação da haste devem-se além do efeito do pastejo menos intenso sobre atributos físicos do solo, menor densidade do solo (Flores, et al. 2008) e perda de água na superfície quanto menor a cobertura por forragem (Conte, 2007), à baixa variabilidade apresentada pelos dados (CV %), em comparação as demais profundidades estudadas. Diferenças entre tratamentos também foram encontradas na profundidade de 18 cm, mas estas não apresentam uma lógica que possa ser relacionada com os tratamentos em questão.

Tabela 3. Índice de mobilização de solo (IM) em função de alturas de manutenção da pastagem e profundidade de atuação da haste sulcadora, sob sistema de integração lavoura-pecuária, em Latossolo.

Tratamentos	Profundidades da haste (cm)					Média
	6	9	12	15	18	
 IM.....					
SP	10,6 a	10,0	10,2	9,9	10,1 a	10,2
P-40	10,3 a	10,6	9,8	10,1	8,3 b	9,8
P-30	10,8 a	10,7	9,8	10,0	8,9 ab	10,0
P-20	9,7 b	9,6	10,3	10,0	9,4 ab	9,8
P-10	9,8 b	9,6	10,3	10,7	9,3 ab	9,9
Média	10,2	10,1	10,1	10,1	9,2	9,9
CV %	4,0	7,1	10,6	8,2	7,4	

Médias seguidas de letras diferentes, nas colunas, diferem entre si pelo teste de Tukey $p < 0,05$, e ausência de letras após as médias indica não significância na análise de variância. P-10, P-20, P-30 e P-40 representam as alturas médias da pastagem de 10, 20, 30 e 40 cm, SP representa área sem pastejo.

Na síntese de dados obtidos em diferentes situações de estudo, sob cultivo de diferentes plantas de cobertura, e analisando a média para os valores de IM para essas culturas (Tabela 4), nas diferentes profundidades de atuação da haste sulcadora, observa-se a tendência que os valores de IM têm em aumentar conforme aumenta profundidade de operação, até 12 cm, e depois decaindo, conforme observado anteriormente na condição de Argissolo. Perante a influência deste fator, planta de cobertura, destaca-se os valores altos de IM obtidos quando da presença de nabo forrageiro, apesar de se dispor de dados somente para três das profundidades do sulcador aqui apresentadas (12, 15 e 16 cm), assim como os valores de IM obtido na consorciação de aveia preta e ervilhaca (Tabela 4). Possivelmente este fato deve-se a particular característica do sistema radicular do nabo, que por apresentar um engrossamento na raiz principal, proporciona rearranjos estruturais na superfície do solo, assim como a interação desta com hastes sulcadoras de semeadoras, o que resulta elevação na área mobilizada de solo para uma mesma profundidade de atuação (Debiasi 2008). Fenômeno semelhante também pode ser a causa do elevado valor de IM para o consórcio de aveia preta e ervilhaca, pois principalmente a ervilhaca apresenta a

capacidade de se enroscar à haste sulcadora, promovendo alterações dimensionais quando a ela associada, e com isso causar elevação na mobilização de solo na linha, fenômeno semelhante a encontrado por Derpsch et al. (1986), que em condição extrema causa amontoamentos.

A condição de pousio refere-se a áreas sem implantação de uma cultura específica, mas que foi vegetada por plantas espontâneas, sendo que as mesmas apresentaram um crescimento expressivo, chegando a até 3 ou 4 Mg ha⁻¹ de massa seca (Debiasi et al., 2008). Dessa forma tem-se o efeito do sistema radicular atuando na agregação e estruturação do solo, assim como contribuição para manutenção da matéria orgânica do solo, e com isso proporcionando um efeito semelhante ao obtido com uma cultura de cobertura implantada, o que se refletiu nos valores de IM. Numa condição de pousio sem a presença de plantas, ou baixa população e produção de biomassa, é de se esperar menores valores de IM, principalmente devido à estruturação e agregação proporcionada pelo sistema radicular.

Tabela 4. Índice de mobilização de solo (IM) em função da cultura de cobertura do solo e das profundidades de atuação das hastes sulcadoras, em Argissolo.

Plantas de cobertura	Profundidades da haste (cm)					Média
	6	9	12	15	16	
 IM					
Aveia preta	6,5	8,9	7,9	7,8	7,9	7,8
Azevém	-	-	9,1	6,9	-	8,0
Nabo forrageiro	-	-	10,8	12,1	10,2	11,0
Aveia + ervilhaca	8,6	9,8	8,3	7,3	-	8,5
Pousio	6,1	8,1	8,7	6,9	6,8	7,3
Média	7,1	8,9	9,0	8,2	8,3	8,5

Quando se implanta uma cultura de cobertura de solo busca-se os benefícios para o sistema no tocante à conservação do solo. Mas como essas plantas tem distintos efeitos sobre atributos do solo devido características particulares, principalmente do sistema radicular, estas apresentam diferentes capacidades de produção de biomassa. A quantidade de resíduos vegetais que entram no sistema solo reflete diretamente na matéria orgânica do solo (Tomazi, 2008), sendo este um importante agente na melhoria de atributos

físicos (Hillel, 2003) e assim possivelmente interferindo na interação solo-máquina, refletindo sobre seu desempenho funcional. Nesse contexto, investigou-se o efeito de doses crescentes de resíduos adicionadas sobre o solo nos valores do IM (Tabela 5). Nesse caso, tem-se o efeito acumulado de oito anos de adição, para o caso da última avaliação realizada, no ano de 2009. Mas os dados apresentados reportam-se a médias obtidas a partir de 2004. Na análise dos dados, somente encontrou-se diferença significativa entre quantidades de resíduos aplicados ao solo para uma das profundidades testadas, a 12 cm, com elevação do IM para adições iguais ou maiores do que 5 Mg ha⁻¹ de resíduos. De certa forma esperava-se um efeito mais acentuado no IM perante essa variável, visto que a adição crescente de resíduos alterou o conteúdo de carbono do solo, e também interferiu no conteúdo de água do solo, por alterar as trocas de água com a atmosfera (Kamimura et al., 2009).

Tabela 5. Índice de mobilização de solo (IM) em função da quantidade de resíduos na superfície e das profundidades de atuação das hastes sulcadoras, em Argissolo.

Resíduos (Mg ha ⁻¹)	Profundidades da haste (cm)				Média
	6	9	12	15	
 IM				
0	6,1	9,8	8,0 b	8,1	8,0
2	6,1	9,2	9,3 b	8,1	8,2
4	6,4	9,7	8,8 b	8,3	8,3
5	6,6	10,5	10,8 a	8,4	9,1
6	6,6	10,2	10,9 a	8,7	9,1
8	7,2	10,1	11,4 a	8,9	9,4
Média	6,5 C	9,9 A	9,9 A	8,4 B	8,7
CV %	13,6	14,1	13,8	6,8	

Médias seguidas de letras diferentes, minúsculas nas colunas e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey, p<0,05, e ausência de letras após as médias indica não significância na análise de variância.

De acordo com os dados obtidos diante da quantidade de resíduos adicionada ao solo (Tabela 5), para as diferentes profundidades de atuação da haste sulcadora, é possível observar que o IM apresenta valores crescentes até atingir a profundidade de 12 cm, e depois disso tende a decair. Essa constatação foi observada para as demais variáveis aqui abordadas, na

condição de estudo sobre Argissolo: tráfego de trator (Tabela 2) e plantas de cobertura (Tabela 4). Cabe ressaltar que o mesmo não ocorreu em Latossolo, onde o IM se mantém elevado mesmo quando se regula as hastes sulcadoras para operar mais profundo no solo.

4.4 Conclusões

1. A influência das zonas trafegadas e não trafegadas por máquinas agrícolas teve pouca expressão sobre o índice de mobilização de solo.

2. Perante as condições de cobertura de solo, encontrou-se diferença entre as mesmas, sendo a que proporcionou maior eficiência de sulcamento às hastes foi o nabo forrageiro, seguido da ervilhaca+aveia e do azevém.

3. Diferentes intensidades de pastejo, em Latossolo, só resultaram diferenças no índice de mobilização quando as hastes sulcadoras operaram a 6 cm, ou seja, em baixa profundidade.

4. A mobilização de solo com a haste sulcadora a 12 cm de profundidade foi diretamente proporcional a quantidade de resíduos vegetais sobre o solo.

5 CAPÍTULO IV. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA COM SEMEADURA DIRETA DE SOJA

5.1 Introdução

Nas últimas décadas, as áreas agrícolas no sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) vêm se tornando mais expressivas no Brasil. Este avanço deve-se aos inúmeros benefícios que se pode obter com o uso desse sistema (Macedo, 2009). Apesar da sua crescente adoção, ainda persistem dúvidas e questionamentos sobre possíveis impactos negativos ligados à degradação de ambiente na sua utilização, principalmente pelo potencial de degradação física do solo (Flores, et al., 2007).

A partir da introdução de animais em sistemas agrícolas, iniciaram-se as preocupações a respeito de possíveis impactos sobre a estrutura física do solo (Correa & Reichardt, 1995). Até início dos anos 90, ainda era possível se observar os efeitos dos intensos preparos primários de solo realizados por longos anos, desde o início da chamada revolução verde, iniciada nos anos 60 no Brasil (Denardin, 1984). Até essa época, perdas expressivas de solo por processos erosivos eram comuns, bem como o problema da compactação de solo, atribuído principalmente ao tráfego de máquinas agrícolas sobre solo desestruturado, devido ao intenso preparo.

Com a presença de animais em ambiente de lavoura, surgiu a preocupação de que os mesmos levariam à degradação física de solo, de forma similar ao que se observava devido ao intenso preparo do solo, causando problemas relacionados principalmente a compactação do solo. Neste contexto, a ILP se expandiu principalmente em solos da região do

Planalto do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, onde as condições são menos favoráveis para a compactação de solo, por se tratar de áreas em SPD consolidado pelo longo tempo de adoção.

Solos que apresentam um longo histórico de uso do SPD normalmente apresentam densidade e resistência mecânica à penetração de raízes mais elevadas e porosidade mais baixa, em relação à condição de preparo anual (Viera & Klein, 2007). Essa diferenciação resulta da eliminação dos preparos mecânicos de solo e do tráfego agrícola acumulado ao longo dos anos. Dessa forma, o uso de animais em pastejo sobre áreas agrícolas acaba se tornando pouco impactante, pois os atributos de solo que poderiam ser afetados já apresentam um estado semelhante que seria alcançado pela ação dos animais em pastejo.

Mas com base em diversos estudos ao longo das últimas décadas (Tanner & Mamaril, 1959; Trein et al., 1991; Correa & Reichardt, 1995; Flores, 2008; Spera et al., 2010), é possível afirmar que todos os solos sob áreas em pastejo sofrem compactação devido à ação do pisoteio dos animais, sendo esse fato agravado quando o solo está com conteúdo de água acima do seu limite de friabilidade. No entanto, o tráfego de máquinas e o pisoteio animal tem características distintas, o que influi no potencial de causar compactação do solo. Pressões exercidas sob pneus agrícolas podem se expressar mais profundamente no perfil do solo, por obedecer a uma relação com a área de contato com o solo (Raper, 2005). O tempo e frequência de tráfegos de máquinas em um ano agrícola é bastante reduzido quando comparado ao pisoteio animal por um período estendido, ou a permanência sobre a área durante toda uma estação de pastejo. Sistemas sem preparo primário de solo, como o SPD, cujo preparo é localizado na linha de semeadura e realizado por sulcadores de semeadoras-adubadoras, representam uma possibilidade de se manejar solos com condições físicas inadequadas de forma a permitir às culturas expressarem o seu potencial produtivo (Conte et al., 2008).

Alterações nos atributos físicos do solo resultantes do pisoteio animal em poucos casos refletiram efetivamente no desempenho produtivo das culturas (Flores et al., 2007, Lopes et al., 2009). Isto se deve principalmente a magnitude dos impactos sobre a estrutura física do solo, pois são mudanças amenas, que podem ser revertidas por processos naturais que ocorrem no

solo, devido à sua capacidade de resiliência. Outro fator que facilita a recomposição dos impactos advindos do pisoteio animal é que esse processo ocorre na superfície do solo (Spera et al., 2009). Isso facilita ações no sentido de restabelecer a condição prévia, seja por agentes naturais ou por operações na semeadura, como o preparo localizado na linha.

Atualmente se dispõe de poucos resultados de pesquisa, principalmente em experimentos com longo histórico de avaliação, com respeito a atributos físicos do solo em sistemas de ILP. O desafio, agora, reside em avaliar se as alterações causadas por máquinas e animais se apresentam em um nível capaz de comprometer a produtividade e a sustentabilidade do sistema produtivo e do ambiente. A preocupação não deveria limitar-se ao sistema de produção e sua manutenção ou perda de eficiência produtiva ou econômica, pois podem haver impactos causados fora deste âmbito, como a saída de água, nutrientes e elementos contaminantes, devido ao efeito causado à estrutura física do solo e sua influência na dinâmica de águas em nível de microbacia hidrográfica.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de sucessivos ciclos de pastejo sobre atributos físicos de solo, buscando verificar a evolução do seu estado num sistema de integração lavoura-pecuária iniciado em 2001 em área em SPD, com períodos intercalados de presença de animais e cultivos de soja.

5.2 Material e Métodos

A caracterização do solo e da área experimental para este estudo está apresentada no Capítulo 2, itens 3.2.1.

A área total do experimento, aproximadamente 21,3 hectares, foi dividida em três blocos, com quatro parcelas cada um, cujas áreas variam conforme mostrado na Tabela 6. Entre os blocos, foi deixada uma faixa de 10 m de largura, sem pastejo, com o mesmo manejo aplicado às demais parcelas, para a pastagem no inverno e para a cultura da soja, no que se refere a adubações e tratos culturais, sendo o tratamento testemunha do experimento.

Tabela 6. Tratamentos de altura de manejo do pasto nos tratamentos e respectivas áreas das parcelas do experimento.

Parcelas	Alturas da pastagem (cm)	Área (ha)
P1	40	3,53
P2	10	1,07
P3	30	1,89
P4	20	1,49
Test 1	Sem pastejo	0,10
P5	30	2,10
P6	40	2,87
P7	20	1,31
P8	10	0,86
Test 2	Sem pastejo	0,10
P9	20	1,32
P10	10	0,90
P11	30	1,60
P12	40	2,19

Os tratamentos constaram do manejo da altura do pasto de inverno: 10, 20, 30 e 40 cm e área sem pastejo (SP); dispostos de acordo com o croqui apresentado na Figura 8. Os mesmos foram arranjados em um delineamento experimental de blocos casualizados (DBC), com três repetições. O acompanhamento da altura do pasto foi feito em intervalos aproximadamente de 14 dias, utilizando-se o método Sward Stick (Bircham, 1981). A altura do pasto foi controlada pelo manejo da carga animal nas parcelas, a qual era variável, utilizando-se animais reguladores, que eram postos ou retirados das parcelas conforme a necessidade.

O sistema de pastejo adotado foi o contínuo. Foram utilizados bovinos jovens, com cerca de um ano de idade, sem padrão racial definido, oriundos da própria Fazenda do Espinilho. Os animais, com uma massa média entre 200 e 250 kg, entravam na área experimental com uma massa de forragem de aproximadamente 2.000 kg ha⁻¹ de matéria seca (em torno de 25 cm de altura), o que normalmente ocorria em meados de julho. Os mesmos permaneciam em pastejo na área até metade de novembro, totalizando um período de 110 a 120 dias.

Normalmente a implantação da pastagem, em semeadura direta, ocorria

uma semana após a colheita da soja, sendo utilizados 100 kg ha^{-1} de aveia preta e 25 kg ha^{-1} de azevém. Em torno de 30 dias após a semeadura, era feita uma aplicação de nitrogênio na dose de 45 kg ha^{-1} , na forma de uréia. Nos demais anos de condução, os procedimentos utilizados se repetiram, com pequenas alterações nas datas de início e final dos ciclos de pastagem e da soja. Mais detalhes da caracterização da área e implantação e condução do experimento, assim como outros resultados dessas determinações foram apresentados por Cassol (2003) e Flores (2008).

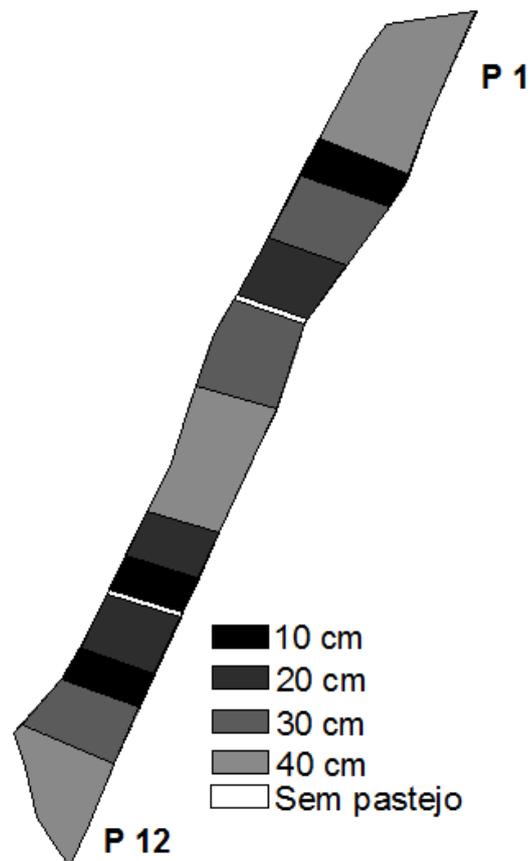


Figura 8. Mapa da área experimental em São Miguel das Missões, com divisão das parcelas (P1 a P12) e blocos separados pelas faixas sem pastejo (Test 1 e Test 2).

5.2.1 Amostragem para determinação da densidade e porosidade do solo

O solo foi amostrado pela primeira vez em maio de 2001, antes da entrada dos animais, para a sua caracterização física e química inicial. A segunda amostragem foi realizada após o primeiro período de pastejo, em

dezembro de 2001. Novas amostragens foram realizadas em novembro de 2004 e 2005, novamente na época da saída dos animais da pastagem, assim como em maio dos mesmos anos (2004 e 2005) no momento da colheita da soja, cerca de cinco meses após o final do período de pastejo.

Foram determinadas a densidade do solo (D_s), a macroporosidade e a microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas de 0 a 2,5, 2,5 a 5,0 e 5 a 10 cm. As amostras foram obtidas com anéis volumétricos com altura de 2,5 e diâmetro de 6,3 cm.

Os procedimentos laboratoriais para se obter a densidade do solo e a porosidade, nas suas subdivisões (macro, micro e total) foram realizados de acordo com a metodologia para análise física de solo proposto por Embrapa, 1997.

5.2.2 Avaliação da agregação do solo

A estabilidade de agregados em água foi determinada ao final da estação de pastejo em 2007 e após a colheita da soja (abril de 2008), em amostras nas camadas de 0 a 10 e de 10 a 20 cm de profundidade segundo o método descrito por Kempbel & Chepil (1965). Utilizando-se o peneiramento em água, obteve-se a distribuição das classes de agregados ($>4,76$, $4,76-2$, $2-1$, $1-0,5$, $0,5-0,25$ e $<0,25$ mm), das quais foi separada a fração areia. A partir destes valores foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP), conforme a equação:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i)$$

em que;

w_i = proporção (%) de cada classe em relação ao total, e

x_i = diâmetro médio das respectivas classes (mm).

5.2.3 Análise estatística

Na análise estatística, compararam-se os tratamentos de altura de manejo do pasto e as camadas amostradas. Quando não houve efeito da altura de manejo do pasto, as camadas foram comparadas para os dados de densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, em cada época de amostragem, após o período de pastejo (PP) e final do ciclo da soja

(PS). Para o diâmetro médio ponderado de agregados, também se comparou alturas da pastagem e as camadas amostradas. Para todas as variáveis analisadas aplicou-se análise de variância, empregando-se o teste de Tukey ($P < 0,05$) para separação das médias.

5.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Evolução da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

Contrariando o esperado, não houve influência significativa da altura de manejo do pasto sobre os atributos físicos de solo, avaliados ao final de cada ciclo de pastejo e da soja, ao longo de 7 anos de avaliação. Verificou-se um aumento nos valores de D_s e porosidade do solo, com redução na porosidade total, à medida que se incrementa a profundidade (Tabelas 7, 8, 9 e 10). Resultados semelhantes foram encontrados por Spera et al. (2009), onde esses autores observaram que a compactação resultante do pisoteio animal não interferiu nos atributos físicos, exceto pelo aumento da D_s na fase pastagem. Estas pequenas alterações na D_s e na porosidade do solo, observadas por diversos pesquisadores (Trein, et al. 1991, Spera et al. 2004, Flores et al. 2007, Spera et al. 2009) são consideradas normais, e são devidas às pequenas alterações na estrutura física do solo em função do pisoteio animal.

As comparações dos valores para os atributos físicos avaliados neste estudo, sejam essas feitas entre o efeito imediato após pastejo com resultados obtidos após o período de desenvolvimento da soja, ou então, a evolução dessas variáveis ao longo de sete anos, não demonstram alteração substancial nas variáveis investigadas. Desta forma, não é possível apontar que ocorram alterações significativas nos atributos físicos de solo avaliados devido à introdução do sistema ILP em Latossolo com os níveis de pressão de pastejo adotados. Segundo Prechac (1992), as propriedades físicas do solo se degradam devido ao uso contínuo do solo sob lavoura, as quais podem ser recuperadas com o plantio de pastagens de gramíneas e, sendo estas

produtivas, influenciarão positivamente a produção de culturas anuais nos cultivos subsequentes. Em áreas sob ILP, são poucos os relatos na literatura de reflexos negativos do período de pastejo sobre a produtividade das culturas subsequentes (Spera, et al. 2004, Flores et al. 2007, Lunardi et al. 2008, Spera et al. 2009) o que demonstra o potencial do uso desses sistemas mistos de produção.

Tabela 7. Evolução da densidade do solo, em diferentes camadas, em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.

Camada de solo cm	Época de amostragem						Média
	Inicial Mai/01 ¹	PP Dez/01 ¹	PP Nov/04	PS Mai/05	PP Nov/06	PS Mai/07	
	Mg dm ⁻³						
0 – 2,5	1,21	1,29 b	1,28b	1,26b	1,28b	1,22b	1,26
2,6 – 5,0	1,36	1,39 a	1,35a	1,35a	1,35a	1,32a	1,35
5,0 – 10	1,35	1,36 a	1,40a	1,36a	1,40a	1,36a	1,37
Média	1,31	1,35	1,34	1,32	1,34	1,30	1,33

PP: Pós-pastejo; PS: Pós soja Letras minúsculas após as médias na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey 5% ($p < 0,05$). ¹ Dados obtidos por Cassol, 2003.

Tabela 8. Evolução da macroporosidade do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.

Camada de solo cm	Época de amostragem						Média
	Inicial Mai/01 ¹	PP Dez/01 ¹	PP Nov/04	PS Mai/05	PP Nov/06	PS Mai/07	
	Mg dm ⁻³						
0 – 2,5	0,13	0,10a	0,14a	0,15b	0,13a	0,15a	0,14
2,6 – 5,0	0,11	0,09a	0,10b	0,08b	0,09b	0,11b	0,10
5,0 – 10	0,11	0,09a	0,09b	0,05b	0,08b	0,10b	0,09
Média	0,12	0,09	0,10	0,09	0,10	0,12	0,10

PP: Pós-pastejo; PS: Pós soja Letras minúsculas após as médias na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey 5% ($p < 0,05$). ¹ Dados obtidos por Cassol, 2003.

Tabela 9. Evolução da microporosidade do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.

Camada de solo cm	Época de amostragem						Média
	Inicial Mai/01 ¹	PP Dez/01 ¹	PP Nov/04	PS Mai/05	PP Nov/06	PS Mai/07	
Mg dm ⁻³						
0 – 2,5	0,39	0,44a	0,41b	0,42	0,44	0,40	0,42
2,6 – 5,0	0,40	0,42b	0,43a	0,44	0,44	0,40	0,42
5,0 – 10	0,40	0,40c	0,40b	0,45	0,45	0,41	0,42
Média	0,40	0,42	0,41	0,44	0,44	0,40	0,42

PP: Pós-pastejo; PS: Pós soja Letras minúsculas após as médias na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey 5% ($p < 0,05$). ¹ Dados obtidos por Cassol, 2003.

Tabela 10. Evolução da porosidade total do solo em diferentes camadas em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD com pastejo no inverno e soja no verão.

Camada de solo cm	Época de amostragem						Média
	Inicial Mai/01 ¹	PP Dez/01 ¹	PP Nov/04	PS Mai/05	PP Nov/06	PS Mai/07	
Mg dm ⁻³						
0 – 2,5	0,52	0,55a	0,56a	0,57a	0,57a	0,55a	0,55
2,6 – 5,0	0,51	0,52b	0,53b	0,52b	0,53b	0,51b	0,52
5,0 – 10	0,51	0,49c	0,50c	0,50b	0,53b	0,51b	0,51
Média	0,51	0,52	0,53	0,53	0,54	0,52	0,53

PP: Pós-pastejo; PS: Pós soja Letras minúsculas após as médias na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey 5% probabilidade. ¹ Dados obtidos por Cassol, 2003.

3.3.2 Agregação do solo após sete anos de ILP

Os valores para DMP de agregados mostram que os tratamentos (alturas de manejo do pasto) e a profundidade de amostragem afetaram o estado de agregação do solo (Tabela 11). Na camada superficial (0 a 10 cm), obteve-se maior DMP de agregados nos tratamentos com pastejo, em relação à área sem pastejo, não havendo diferenciação entre as intensidades de pastejo. Esses resultados são indicativos de que a presença dos animais contribuiu para a estabilização de agregados, seja de forma direta (pelo efeito do pisoteio) ou de forma indireta (afetando a fauna do solo e a dinâmica do pasto). O pastejo

altera a composição do pasto e promove incremento, em termos de massa por área, do sistema radicular das plantas forrageiras (Conte, 2007; Souza et al., 2010), alterando também as funções que as raízes exercem no solo, como a agregação (Salton, et al., 2008), o que pode levar a aumento da estabilidade de agregados do solo, medida nesse caso pelo DMP de agregados.

Tabela 11. Diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração agricultura-pecuária, submetido a intensidades de pastejo sob SPD.

Profundidades cm	Intensidades de pastejo				
	SP	P-40	P-30	P-20	P-10
0 a 10	2,85aB	3,54aA	3,52aA	3,92aA	3,59aA
10 a 20	2,16bB	2,78bA	3,05bA	2,57bA	2.30bB
Média	2,50	3,16	3,28	3,33	2,94

Letras minúsculas, na coluna, separam o efeito de profundidade. Letras maiúsculas, na linha, comparam o efeito dos tratamentos dentro da mesma profundidade. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p < 0,05$). P-10, P-20, P-30, P-40 e SP representam 10, 20, 30, 40 cm de altura do pasto e sem pastejo, respectivamente.

Apesar dos resultados obtidos, ainda é cedo para se afirmar que o aumento do DMP de agregados em áreas sob pastejo é um indicativo de melhoria no estado de agregação do solo. A utilização do DMP como variável isolada, não é um bom indicativo da qualidade estrutural do solo, pois solos compactados podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água e, conseqüentemente, maiores valores de DMP, mas as relações na distribuição entre microporos, macroporos e a porosidade total encontram-se alteradas e em níveis não adequados para o desenvolvimento de culturas exploradas comercialmente (Paladini & Mielniczuk, 1991). No presente estudo, pode-se estar diante da situação de ter-se agregados estabilizados pelo amassamento do solo, devido ao pisoteio animal, os quais não apresentam características estruturais desejáveis como de solos considerados bem estruturados, sendo apenas mais estáveis em água do que os agregados encontrados na área sem pastejo. De acordo com Marchão (2007), a estabilidade de agregados pode aumentar rapidamente com a inclusão de pastagens na rotação com culturas,

devido à combinação de três efeitos principais; a ausência de preparo durante o ciclo da pastagem; presença de abundante sistema radicular, que atua como agente de agregação; e o aumento da atividade da macrofauna do solo em pastagens.

Aumento no DMP de agregados é comumente encontrado em solos conduzidos com manejos que promovam a entrada de biomassa no sistema, promovendo elevação no teor de carbono do solo e com a presença de espécies que tenham sistema radicular abundante, principalmente de gramíneas, uma vez que, a formação e a estabilização dos agregados estão ligadas ao crescimento das raízes e dinâmica da matéria orgânica do solo (Silva & Mielniczuk, 1997; Salton et al., 2005).

Ao comparar as profundidades de amostragem, (Tabela 11), verifica-se decréscimo no DMP de agregados na camada de 10 a 20 cm em relação à camada superficial (0 a 10 cm). Nessa camada foi detectado diferença para os tratamentos, sendo que a menor altura do pasto (10 cm) apresentou menor DMP em relação às demais alturas, equiparando-se a área sem pastejo (SP). A presença de agregados com maior DMP na camada mais superficial se deve principalmente ao fato do sistema radicular das espécies forrageiras anuais envolvidas (aveia preta e azevém) se concentrar na camada mais superficial do solo, até 10 cm de profundidade (Souza et al., 2010).

Ao fazer uma análise conjunta das variáveis analisadas neste trabalho (Ds, porosidade e agregados), pode-se concluir que o pisoteio animal afeta alguns atributos físicos do solo, principalmente na camada 0 a 10 cm. Porém, a magnitude não se reflete na produtividade da cultura subsequente ao pastejo, no caso a soja, cuja produtividade é avaliada ano a ano e até o momento da redação deste trabalho não foi constatada diferenças entre os tratamentos, conforme demonstrado nos trabalhos de Flores et al. (2007), Lopes et al. (2009) e Carvalho et al. (2010).

5.4 Conclusões

1. Os atributos físicos, densidade e porosidade do solo não sofreram alterações devido à adoção do sistema integração lavoura-pecuária após sete

anos de sua adoção.

2. O diâmetro médio ponderado dos agregados foi maior na camada superficial, com aumento no DMP de agregados na área pastejada em relação à área sem pastejo.

6 CAPÍTULO V. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DA SOJA, EM SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

6.1 Introdução

A variabilidade em atributos de solo é considerada intrínseca, devido à heterogeneidade apresentada no espaço. Muitos fatores contribuem para isso, como os fatores de formação do solo e a intervenção humana, introduzindo manejos diferenciados ao solo o que amplia a variabilidade nos seus atributos, tanto em sentido vertical como lateralmente (Souza, 1992). Sendo o solo um sistema aberto, e composto por fase sólida, líquida e gasosa, com constantes processos de adição, remoção e transformações com fluxo de energia e matéria desde sua formação, conferindo-lhe heterogeneidade intrínseca (Smeck et al., 1993). Desta forma, mesmo em uma área restrita, onde se poderia pressupor homogeneidade no solo, é pouco provável que tenha ocorrido a mesma combinação de fatores e processos na gênese da condição presente no momento da amostragem, e com isso a probabilidade da existência de variabilidade espacial é considerável.

Sabendo-se da variabilidade intrínseca apresentada pelos atributos de solo, faz-se necessário considerá-la na experimentação. Na estatística clássica, introduziu-se a casualização e a repetição para contornar esse problema e considerando-se a variabilidade como sendo aleatória, e assumindo-se a independência entre as amostras para poder representar o fenômeno por meio da média e do desvio padrão. No entanto, é errôneo considerar que determinado atributo apresenta variabilidade aleatória sem testar se ocorre dependência espacial, o que é comprovado por meio da autocorrelação e expresso pelo semivariograma. Havendo dependência

espacial não se pode recorrer às ferramentas da estatística clássica, e assim devendo-se utilizar os princípios da geoestatística, (Vieira, 1982). Ocorrendo continuidade espacial de determinada variável medida, comprovada pelo uso das ferramentas da geoestatística, é possível estimar valores para as regiões não amostradas, sem tendência e com variância mínima, por meio de um método de interpolação chamado de krigagem (Vieira, 2000).

A condição absoluta para o uso da geoestatística é o conhecimento da posição espacial de onde as amostras foram obtidas, ou seja, suas coordenadas geográficas obtidas por aparelhos de GPS ou por métodos topográficos por distâncias a partir de uma origem (Vieira, 2000).

Para uma adequada representação espacial do fenômeno e da variabilidade de determinado atributo de solo ou planta, na amostragem o espaçamento entre as amostras deve ser menor do que as “manchas” ou zonas que apresentam comportamento distinto. Quanto mais detalhada a amostragem, mais fácil de diagnosticar variabilidade em curto espaço. Porém, inconveniente é o custo de amostragem, seja financeira, disponibilidade de recursos humanos e de tempo disponível. Também deve-se levar em consideração o objetivo para que se deseja, definindo a intensidade da amostragem.

Segundo Vieira (2000), medições localizadas próximas são mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Assim, a semivariância aumenta com a distância até um valor máximo, no qual se estabiliza em um patamar correspondente à distância limite de dependência espacial, que é o alcance. Medições localizadas a distâncias maiores que o alcance, apresentam distribuição aleatória, e por esta razão são independentes entre si, e neste caso cabe o uso da estatística convencional.

No cenário atual, onde a agricultura moderna usa dos princípios da agricultura de precisão e suas ferramentas para expressar a variabilidade da produtividade ou dos atributos de solo, é preciso o suporte da geoestatística para validação dos conceitos e nortear de forma correta a expressão da variabilidade espacial de quaisquer variáveis em questão. O mapeamento de determinada variável permite investigar a respeito de sua variabilidade espacial, e a sequência temporal de mapas de uma determinada variável permite a análise no tempo deste fator, assim como aplicar manejos

localizados (Molin, 2002, Amado et al., 2007). Mapas de produtividade são considerados a melhor opção para representar a variabilidade espacial de áreas agrícolas (Molin, 2002). Conforme Carvalho et al., (2002), é crescente a preocupação em medir a variabilidade espacial e temporal de propriedades que afetam a produtividade das culturas, tendo como o principal objetivo a redução de custos. Características físicas, químicas e biológicas do solo têm sido amplamente investigadas sob o aspecto da variabilidade espacial para a melhoria dos processos agrícolas. Também fazem parte desse processo as operações mecanizadas, como citam Prado et al., (2002), que, por sua vez, representam uma fatia considerável dos custos de produção.

Sistemas agrícolas integrados são comumente empregados no contexto agrícola brasileiro. A integração lavoura-pecuária assumiu um importante papel no contexto produtivo, incrementando a produtividade e lucratividade do sistema (Macedo, 2009). Mas a presença de animais em excesso ou por longo período pode promover degradação das propriedades físicas do solo (Flores, et al., 2007, Souza, et al., 2008). Muitos trabalhos tem sido realizados envolvendo o emprego de geoestatística no estudo da variabilidade espacial, dentre estes, avaliação de atributos físicos de solo (Greco & Vieira, 2005), resistência mecânica do solo à penetração e conteúdo de água do solo (Utset & Cid, 2001), em bacia hidrográfica (Gomes, et al. 2007), relacionados à produtividade (Johann, et al., 2004, Faraco et al., 2008), em pastagem e vegetação natural (Silva et al., 2008 Lima, et al. 2009) no contexto de pastagem (Miguel et al., 2009) e atributos químicos de solo (Parfitt et al., 2009, Couto & Klant, 1999, Silva & Chaves, 2001, Vieira et al. 2009). No entanto, não têm sido encontrados estudos que abordem variabilidade espacial de atributos de solo e das culturas que compõem sistemas de integração lavoura-pecuária, o qual tem indubitável relevância no cenário produtivo atual.

Diante das pressuposições que levam a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos de solo, planta e parâmetros relacionados à interação solo máquina, como a demanda de força de tração, investigou-se estas variáveis quanto à dependência espacial em um sistema que utiliza integração lavoura-pecuária há 8 anos. Buscou-se avaliar a influência de diferentes pressões de pastejo, alterando o número de animais por área e, conseqüentemente, a quantidade de forragem e resíduos da pastagem, sobre

os atributos de solo e de planta. A presença de divisões sobre a área em estudo, onde são locados os tratamentos de altura de manutenção da pastagem é por si um fator causador de variabilidade espacial nos atributos de solo e, conseqüentemente, na cultura sucessora à pastagem, no caso a soja. Ao aplicar as ferramentas de geoestatística, além de avaliar a dependência espacial das variáveis em questão, espera-se investigar se os tratamentos diferenciados de intensidade de pastejo geram variabilidade nos atributos estudados. Se a estrutura de dependência espacial para as variáveis em estudo determinar contornos comuns com as divisões das parcelas experimentais, há influência dos tratamentos na variabilidade e dependência espacial das mesmas.

Com esse trabalho espera-se poder demonstrar se a variabilidade espacial das variáveis em estudo tem influência dos tratamentos aplicados à pastagem. Caso isso ocorra, aquelas variáveis que são influenciadas pelas diferentes intensidades de pastejo, apresentarão variabilidade expressa no campo, de acordo com a localização dos respectivos tratamentos. Este comportamento é mais fortemente esperado para variáveis de solo que são influenciadas pelo pisoteio animal, como é o caso da resistência mecânica do solo à penetração, e correlato a esta, a força de tração demandada por hastes sulcadoras. Já com relação aos atributos químicos de solo analisados espera-se menor influência na variabilidade espacial, mas mesmo assim pode haver interferência principalmente naqueles nutrientes de rápida ciclagem e de maior mobilidade no solo, tendo a expressão destes processos potencializada pela presença de animais se alimentando e produzindo excrementos (feses e urina).

Por fim, de forma integradora, como resultado do somatório de fatores interagindo no solo tem-se a resposta da cultura em sucessão à pastagem, e com isso se investigará o comportamento espacializado da produtividade de grãos de soja, assim como da população de plantas, do número de legumes por planta e massa de mil grãos de soja.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Descrição da área experimental

A caracterização do solo, histórico da área, localização e demais detalhes do local do experimento são descritos no item 3.2.1 (Capítulo 2).

A área total do experimento é de aproximadamente 21,3 hectares, sendo dividida em 12 parcelas correspondendo aos quatro tratamentos com as três repetições, ajustadas em três blocos, sendo que entre estes são locadas duas faixas com 10 metros de largura, onde não ocorre pastejo, conforme mostrado na Figura 8 (Capítulo 4). Os tratamentos constaram do manejo da altura do pasto de inverno: 10, 20, 30 e 40 cm e área sem pastejo (SP). O manejo aplicado à pastagem, assim com o controle de altura, encontram-se descritos no item 3.2.1 (Capítulo 2).

6.2.2 Adubação da soja e da pastagem

Todas as adubações realizadas na área experimental foram realizadas a lanço e na superfície do solo com auxílio de maquinaria guiada por sistemas de GPS com correção de sinal. Desta forma assegura-se uma distribuição mais uniforme, sem a interferência de aplicações em linha, o que pode gerar gradientes horizontais na distribuição, principalmente nos nutrientes menos móveis no solo. Conseqüentemente também têm-se um tráfego de máquinas mais ordenado sobre a área, o que se reflete em menor área compactada por rodados, associado à utilização de maquinaria com elevada largura útil de trabalho, nas diferentes operações necessárias no sistema.

A adubação do sistema consiste basicamente na aplicação de fósforo e nitrogênio na pastagem e de fósforo e potássio na cultura da soja, para obtenção de uma produtividade de 4,0 Mg ha⁻¹ segundo as indicações do CQFS-RS/SC (2004), considerando-se os valores de análise do solo. Na implantação da pastagem (maio/2001), não se aplicou nenhum tipo de adubação de base, apenas aproveitando-se o residual da adubação fornecida para a soja na safra anterior (2000/01). Uma adubação nitrogenada de cobertura foi realizada 40 dias após a implantação da pastagem, utilizando-se

45 kg de N ha⁻¹, tendo como fonte a uréia. Em dezembro de 2001, na semeadura da soja, com sementes inoculadas, fez-se a adubação de base, utilizando-se 300 kg ha⁻¹ de superfosfato simples. No segundo cultivo da pastagem, em maio de 2002, a adubação de base foi de 300 kg de superfosfato simples ha⁻¹ e, 40 dias após a semeadura, fez-se uma adubação nitrogenada aplicando-se 45 kg de N ha⁻¹ na forma de uréia. Em dezembro de 2002, foi iniciado o segundo cultivo da soja, utilizando-se uma adubação de 300 kg ha⁻¹ da fórmula 0-20-30 (N-P₂O₅-K₂O) e a adição de inoculante às sementes. Nas safras 2003/04, 2004/05 e 2005/06 foram utilizados 300 kg ha⁻¹ das fórmulas 5-20-20, 0-20-30 e 0-20-30, respectivamente, mais a adição de inoculante às sementes. A partir da safra 2006/07, as adubações foram as seguintes: 300 kg ha⁻¹ da fórmula 0-20-20 na implantação da cultura da soja (novembro) mais a utilização do inoculante junto às sementes e, passou-se a não realizar mais adubação na implantação da pastagem (maio), utilizando somente 45 kg de N ha⁻¹ de cobertura na forma de uréia.

6.2.3 Amostragem espacializada

A área foi amostrada com distribuição de pontos ao acaso e sendo os mesmos localizados por coordenadas geográficas obtidas por meio de aparelho GPS (Global Positioning System). O número de pontos de amostragem obtidos para cada variável estudada foi diferente. Na coleta de amostras para análise de atributos químicos foram tomadas amostras em 78 pontos, sendo que cada amostra foi composta de 10 subamostras obtidas com pá de corte até 20 cm de profundidade, separando as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Foram locadas de quatro a dez amostras por parcela, dependendo do tamanho das mesmas, e na média, cada amostra corespondeu a aproximadamente 2.500 m². Não foram obtidas amostras para as variáveis químicas nas faixas sem pastejo, pois no início do experimento ocorreram subdivisões das mesmas com o intuito de testar diferentes doses de calcário. As amostras foram submetidas às análises químicas para determinar macronutrientes (P, K, S, Ca e Mg), teor de MO, concentração de Al³⁺, o pH em água e com isso calculou-se a capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (S), saturação por bases (V) e o índice SMP. Nos procedimentos e

análises químicas de laboratório, seguiram-se as metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

Para análise da resistência mecânica do solo à penetração no final do período de pastejo, momento da implantação da soja, safra 2007/08, o número de pontos de amostragem foi de 241, e na amostragem após o cultivo da soja foram obtidos 130 amostras, segundo o procedimento para avaliação do produtividade da soja, obedecendo à mesma posição. Para as avaliações da RP utilizou-se um penetrômetro eletrônico com especificações técnicas segundo a normatização ASAE S 313.3 (2004), onde cada ponto de amostragem foi composto de três mensurações até 30 cm, com intervalo de 1 cm, mas analisando-se camadas de 10 em 10 cm.

Os dados referentes ao esforço de tração nas hastes sulcadoras que equiparam a semeadora-adubadora foram obtidos conforme descrição encontrada no item 3.2.3. A variação, na profundidade de trabalho das hastes sulcadoras, nos diferentes testes foi obtida não apenas com hastes sulcadoras de diferentes comprimentos, mas também por meio de ajustes na posição da haste em relação ao seu respectivo suporte.

Para a obtenção dos valores de FT nas hastes, estas foram equipadas com sensores específicos para este fim. Maiores detalhes a respeito da instrumentação utilizada são apresentados por Cepik (2006) e Hemmat & Adamchuk (2008). As coordenadas geográficas para os dados de FT foram ajustadas locando-se pontos sobre a trajetória percorrida no campo e registrada por GPS. A área do experimento, de aproximadamente 21,3 hectares, com formato conforme pode ser visualizado na Figura 8 (Capítulo 4) foi coberta por passagens da semeadora, portando as hastes instrumentadas, distando de cerca de 10 metros no sentido longitudinal. Ao longo da linha de deslocamento da semeadora, foram locados pontos distando de aproximadamente 5 metros, correspondendo a amostras de FT resultantes da média de cinco dados gerados pelo sensor.

Na determinação da produtividade da soja, safra 2006/07, foram obtidos 130 amostras na área total do experimento, sendo 10 amostras por parcela e 5 em cada faixa sem pastejo. As amostras foram tomadas colhendo-se dois metros lineares de duas linhas. Depois de colhidas, as amostras foram trilhadas, os grãos secos e pesados, ajustando-se a conteúdo de água para o

valor de 13%. De cada amostra foram retiradas 10 plantas ao acaso onde se fez a contagem de legumes a fim de determinar esse componente de produção. Da massa de grãos da amostra de soja, foram separados, contados e pesados mil grãos, sendo esse procedimento realizado em laboratório.

6.2.4 Análise geoestatística de dados

Os resultados das diferentes variáveis analisadas foram submetidos à análise estatística descritiva, obtendo-se média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Posteriormente as ferramentas de geoestatística foram usadas para avaliar a variabilidade espacial dos atributos estudados, de acordo com procedimentos descritos por Vieira et al. (2002). A fim de se empregar a análise geoestatística, foi necessário calcular a dependência espacial dos atributos estudados, o que pode ser verificado por meio dos semivariogramas. Os semivariogramas que apresentaram dependência espacial para uma determinada variável foram ajustados de acordo com um dos modelos matemáticos sem patamar (esférico, gaussiano ou exponencial).

A análise geoestatística foi utilizada para verificar a dependência espacial das variáveis e interpolar os dados a fim de construir mapas dos atributos em estudo. Foram elaborados semivariogramas, baseados na teoria das variáveis regionalizadas para dados não tendenciosos, com o cálculo da autocorrelação estatística entre os dados amostrais, definindo a semivariância $\gamma(h)$ como demonstra a equação (1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_i - Z_{i+h}]^2 \quad (1)$$

em que:

$\gamma(h)$ - semivariância para a classe de intervalos com distância h ;

$N(h)$ - número de possíveis pares de observações separadas por um vetor de módulo h , e

Z_i e Z_{i+h} - valores medidos nos pontos i e $i+h$.

Os programas computacionais e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma obedeceram às instruções de Vieira et al. (2002) e foram executados no software GS+™, conforme Robertson (2008). A escolha do modelo obedeceu ao critério de apresentar a menor soma de quadrados dos resíduos (SQR) e, conseqüentemente maior coeficiente de determinação múltipla (R^2), e da validação cruzada.

Para testar a presença de anisotropia, foram calculados semivariogramas em quatro direções com intervalo de 45° (0, 45, 90 e 135 °). Não foi constatada a existência de anisotropia no conjunto de variáveis estudadas. Segundo Vieira (2000) considerar anisotropia é um procedimento inútil, pois não existe dependência espacial média, e, com isso assumiu-se isotropia e o semivariograma médio.

Com os parâmetros do semivariograma; (C_0 = efeito pepita; a = alcance; $C_0 + C$ = patamar, e C = variância estrutural), foi obtido o avaliador de dependência espacial (ADE), que é a proporção do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C$). Quando o ADE for superior a 0,75, a dependência espacial é considerada forte; entre 0,75 e 0,25, dependência moderada, e abaixo de 0,25, dependência fraca (Zimback, 2001).

Observada a existência de dependência espacial definida pelo semivariograma, os valores vizinhos serão semelhantes, e assim será possível estimar valores para qualquer local onde a variável não foi medida, usando-se a ferramenta da geoestatística denominada de krigagem, segundo Vieira et al. (2002). A krigagem permite estimar valores sem tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima. Com o resultado da krigagem, foram construídos mapas de contorno com auxílio do software Surfer 9.0 (Golden Software, 1999), o que permite a visualização da distribuição espacial das variáveis na área em estudo.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Estatística descritiva para as diferentes variáveis em estudo

A análise descritiva dos dados os considera espacialmente

independentes, mas ajuda a identificar anormalidades na sua distribuição o que pode interferir na análise de distribuição espacial (geoestatística). A distribuição normal dos dados pode ser avaliada principalmente por meio dos seus coeficientes de curtose e assimetria. O coeficiente de assimetria avalia o quanto a distribuição de frequência se afasta da simetria. Se este for igual a zero, a distribuição é simétrica, se for positivo tem-se uma assimetria à direita e negativo, à esquerda. Os valores devem tender a zero para uma distribuição normal de frequência, assim como os valores para o coeficiente de curtose.

Nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 são encontrados os valores para coeficiente de variação (CV), desvio padrão (DP), mínimo, máximo, assimetria e curtose, para a estatística descritiva dos dados de resistência mecânica do solo à penetração (RP), força de tração (FT), atributos químicos de solo e variáveis relacionadas à cultura da soja, respectivamente. Por meio da assimetria e curtose pode-se inferir sobre a distribuição normal das diferentes variáveis. A resistência mecânica do solo à penetração (Tabela 12) apresentou valores de assimetria baixos, tendendo a zero, nas diferentes camadas analisadas, assim como nas duas ocasiões. Exceção para curtose na camada 20 a 30 cm, na amostragem realizada por ocasião da semeadura, e em ambos os coeficientes (assimetria e curtose) na camada de 10 a 20 cm, na amostragem realizada no momento da colheita. Considerações semelhantes podem ser feitas a respeito da força de tração (Tabela 13), onde os coeficientes de assimetria foram baixos nas diferentes profundidades de aquisição e momentos de avaliação. Os valores de curtose distaram de zero para as profundidades de operação das hastes de 9 e 12 m, na semeadura da safra 2007/08. No entanto, para as variáveis RP e FT, mesmo onde os coeficientes de assimetria e curtose indicaram distribuição não normal, o CV apresenta valores médios. Os valores do CV para RP corroboram com os encontrados por Mercante et al., (2003). Segundo Warrick & Nielsen (1980), o CV também pode ser considerado para classificar dados como tendo distribuição normal. Tanto para RP, quanto para FT, o coeficiente de assimetria apresentou valores positivos, indicando deslocamento à direita no gráfico de distribuição de frequências.

Tabela 12. Estatística descritiva para resistência mecânica do solo à penetração (RP) em kPa, avaliada antes da semeadura da soja (novembro 2007) e após a colheita da soja (maio 2008).

Profundidade	RP	DP	C. V.	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
Pré semeadura da soja							
0 a 10	1634	466,1	28,5	249	2892	0,22	-0,28
10 a 20	1440	240,9	16,7	663	2466	0,47	1,57
20 a 30	2228	375,8	16,9	1202	3806	0,95	2,85
Pós colheita da soja							
0 a 10	1474	427,1	28,9	167	2912	0,24	1,37
10 a 20	2136	398,2	18,7	1249	3837	1,24	2,79
20 a 30	2748	489,6	17,8	1865	4296	0,67	0,28

CV; coeficiente de variação, DP; desvio padrão.

Tabela 13. Estatística descritiva para força de tração média (FT) em hastes sulcadoras (N) operando em diferentes profundidades em duas épocas de avaliação.

Profundidade sulcamento	Média	DP	C. V.	Mín.	Máx.	Assimetria	Curtose
cm	Semeadura da soja safra 2007/08						
6	668,7	90,6	13,51	382	1009	0,25	0,14
9	1760,9	201,6	11,24	333	3332	0,46	4,42
12	2892,4	383,7	13,03	235	5018	0,35	2,82
	Semeadura da soja safra 2008/09						
9	2093,9	284,4	13,58	1098	2960	0,04	0,46
12	2967,7	817,1	27,53	1049	5067	0,30	- 0,76
15	4480	836,9	18,68	1813	7056	0,39	0,53

CV; coeficiente de variação, DP; desvio padrão, Mín; mínimo, Máx. máximo

Com relação aos atributos químicos de solo avaliados, constantes como as variáveis da Tabela 14, é possível inferir que a distribuição dos mesmos foi normal, onde todos apresentaram coeficiente de assimetria e curtose tendendo ao valor zero, e com médio e baixo CV, com exceção do Al³⁺ que apresentou alto CV. Júnior et al. (2010), ao avaliar macronutrientes em Latossolos, encontrou coeficientes de variação superiores aos obtidos neste estudo, para diferentes variáveis químicas de solo.

Tabela 14. Estatística descritiva para atributos químicos do solo avaliados em duas profundidades, 0 a 10 e 10 a 20 cm, em dezembro de 2008.

Variáveis	Média	DP	C. V.	Mín.	Máx.	Assimetria	Curtose
Camada 0 a 10 cm							
P	15,03	3,71	24,66	5,8	23,90	0,43	-0,08
K	101,7	29,35	28,87	29,00	185,0	0,11	0,01
Ca	5,258	1,02	19,39	2,61	7,28	0,13	-0,36
Mg	2,820	0,49	17,48	1,63	4,15	0,17	-0,24
Al ⁺³	1,305	1,07	82,15	0,00	5,68	1,63	3,49
MO	4,080	0,49	12,17	3,08	7,22	3,00	20,25
pH	4,712	0,32	6,88	4,10	5,90	0,97	2,11
SMP	5,288	0,29	5,56	4,30	5,90	0,37	0,93
H + Al	7,045	2,05	29,05	3,90	16,60	1,65	5,47
CTC	9,657	1,03	10,67	6,14	12,46	-0,88	1,24
V	54,44	9,26	17,01	29,50	74,50	0,10	0,21
Sat. Al ⁺³	13,70	1,28	9,32	10,40	17,30	0,16	0,54
Camada 10 a 20 cm							
P	6,105	1,54	25,22	3,10	9,90	0,66	0,69
K	87,15	43,43	49,83	42,00	136,0	0,98	1,67
Ca	3,44	0,79	22,85	2,22	5,96	0,89	0,97
Mg	2,07	0,46	22,02	1,28	3,43	0,63	0,16
Al ⁺³	4,92	2,03	41,26	1,24	9,99	0,49	0,75
MO	2,79	0,31	11,00	2,10	3,60	0,52	0,56
pH	3,95	0,36	9,06	3,30	4,80	0,65	-0,95
SMP	4,88	0,25	5,06	4,40	5,50	0,28	-0,45
H + Al	10,12	2,22	21,90	5,60	15,20	0,30	-0,19
CTC	10,74	2,03	18,87	6,80	18,60	0,76	1,80
V	36,63	8,62	23,54	21,00	58,10	0,49	0,23
Sat. Al ⁺³	45,12	13,47	29,85	11,50	78,80	0,13	0,13

CV; coeficiente de variação, DP; desvio padrão, Mín; mínimo, Máx. máximo, P: fósforo (mg dm⁻³), K: potássio (mg dm⁻³), Ca: cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg: magnésio (cmol_c dm⁻³), Al⁺³: alumínio (cmol_c dm⁻³), MO: matéria orgânica %, pH: pH do solo em água, SMP: índice SMP, H + Al: acidez potencial, CTC: capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³), V: soma de bases (cmol_c dm⁻³), Sat. Al: saturação da CTC por Al⁺³ (%).

Os valores para o coeficiente de assimetria foram na sua maior parte positivos, exceto para a variável CTC na camada 0 a 10 cm, corroborando com dados de Júnior et al., (2010).

Na análise descritiva de dados também é importante verificar o coeficiente de variação (CV) que pode fornecer informação quanto à dispersão dos dados. Elevados CVs podem indicar alta dispersão. Warrick & Nielsen (1980), sugerem que CV iguais ou superiores a 60% são considerados elevados, entre 12,1 e 60 % médios e abaixo de 12% baixos.

Desse modo, considerou-se que os dados referentes às variáveis RP (Tabela12), FT (Tabela13) e atributos relacionados à produtividade da soja (Tabela 15) obedecem a uma distribuição normal sem prejuízo quanto à aplicação das ferramentas de geoestatística para análise de dependência espacial na sua distribuição.

As variáveis relacionadas à cultura da soja (Tabela 15), apresentaram distribuição normal, a julgar pelos coeficientes de assimetria e curtose, assim como por apresentar valores médios de CV, para produtividade, plantas por área e número de legumes por planta, com assimetria positiva, (deslocamento à direita), e baixo para a massa de mil grãos, porém com assimetria negativa (deslocamento à esquerda).

Tabela 15. Estatística descritiva para produtividade de soja (kg ha^{-1}), número de plantas por m^2 , número de legumes por planta e massa de mil grãos de soja (g), safra 2007/08.

Variáveis	Média	DP	C. V.	Mín.	Máx.	Assimetria	Curtose
Grãos	2618	377.2	14,4	1703	3373	0,07	-0,39
Plantas	26,9	3,4	12,8	21,4	34,6	0,21	0,42
Legumes	40,2	7,97	19,8	22,4	61,60	0,13	-0,14
Mil grãos	176,8	7,162	4,05	154,6	193,2	-0,27	0,10

CV; coeficiente de variação, DP; desvio padrão, Mín; mínimo, Máx. máximo

6.3.2 Parâmetros geoestatísticos obtidos dos semivariogramas ajustados para as diferentes variáveis em estudo

Os dados apresentados nas Tabelas 12 a 15 foram submetidos a análises de estatística clássica, onde se assume independência e

aleatoriedade na distribuição.

Nas Tabelas 16, 17, 18 e 19 encontram-se os parâmetros obtidos dos semivariogramas escalonados para as diferentes variáveis: resistência do solo à penetração (RP), força de tração em hastes sulcadoras (FT), atributos químicos de solo (macronutrientes, Al^{3+} , MO, pH, SMP, saturação da CTC por bases trocáveis (V) e por Al^{3+}), e atributos de soja (produtividade da soja, plantas por m^2 , número de legumes por planta e massa de mil grãos), respectivamente. Os parâmetros apresentados são, primeiramente, os modelos aos quais os dados se ajustaram (exponencial, esférico ou gaussiano), efeito pepita (Co), patamar (Co+C), alcance, coeficiente de determinação (R^2); soma de quadrados dos resíduos (SQR); avaliador da dependência espacial (ADE). Quando os dados não se ajustaram a um desses modelos, apresentando-se linear, ou seja, a semivariância (y) não aumentou para aumentos de (x) que representa a distância, diz-se ter a presença de efeito pepita puro o que representa a ausência de dependência espacial para aquela variável. Neste caso, não se tem subsídio geoestatístico para se aplicar a krigagem e assim obter dados para os locais não amostrados a fim de obter o mapeamento da referida variável, por exemplo em mapas de contorno. O efeito pepita puro só foi encontrado em algumas variáveis dos atributos químicos, como para o magnésio (Apêndice 6), o pH (Apêndice 7) e a saturação da CTC por Al^{3+} (Apêndice 8), na camada de 0 a 10 cm e para o índice SMP (Apêndice 7), o valor V, que representa a saturação da CTC por bases trocáveis e para a saturação da CTC por Al^{3+} , na camada de 10 a 20 cm (Apêndice 9). Todas as demais variáveis de solo, químicas e físicas (RP), ou obtidas na relação solo-máquina, como a FT, e os atributos de soja, ajustaram-se a um dos modelos, demonstrando apresentar um comportamento com dependência espacial.

Na Tabela 16, encontram-se os modelos e parâmetros do semivariograma para RP, nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, e em duas ocasiões de amostragem, no final do período de pastejo correspondendo à semeadura da soja e no momento da colheita da soja. Pode-se observar que os dados ajustaram-se aos diferentes modelos, sem efeito pepita puro e com moderada e forte dependência espacial, comprovada pelo valor do avaliador de dependência espacial (ADE), de acordo com a classificação sugerida por Zimback (2001). Santos et al. (2005) ao estudar correlação de RP com

rendimento do feijoeiro também encontrou dependências espaciais moderadas e fortes para este atributo, assim como os resultados de Mercante et al. (2003).

Um fator importante dentre os parâmetros apresentados é o alcance, pois este demonstra a máxima distância em que ocorre a correlação espacial. A partir do alcance é possível planejar novas amostragens, pois este indica a distância que devem estar os pontos de amostragem. Segundo Mulla & McBratney (2000), esta distância deve estar entre 0,25 e 0,50 do valor alcance.

Tabela 16. Parâmetros do semivariograma ajustados para resistência mecânica do solo à penetração (kPa), em diferentes camadas do perfil do solo e em duas ocasiões de amostragem, (novembro de 2007 e abril de 2008).

Prof.	Modelo	Co	Co+C	Alcance	R ²	SQR	ADE
cm							
Pré semeadura da soja novembro 2007							
0-10	Esf.	99900	203600	441	0,91	7,74x10 ⁸	0,50
10-20	Exp.	27790	55590	344	0,90	3,95 x10 ⁷	0,50
20-30	Gau.	100	110100	25	0,71	1,2 x10 ⁹	0,99
Pós colheita da soja abril 2008							
0-10	Exp.	10700	201500	153	0,52	4,01x10 ⁹	0,94
10-20	Esf.	72300	210100	438	0,89	2,21x10 ⁹	0,66
20-30	Esf.	139300	278700	301	0,93	1,32x10 ⁹	0,99

Prof.- profundidade em cm, Esf.- modelo esférico; Exp.- modelo exponencial; Gau.- modelo gaussiano; C0 - efeito pepita; C0+C - patamar; R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrados dos resíduos; ADE - avaliador da dependência espacial (C/CO+C).

Na Tabela 17, são expostos os modelos e parâmetros dos semivariogramas para a variável FT obtida em haste sulcadora da semeadora, de acordo com a profundidade de atuação das hastes nas diferentes ocasiões de amostragem, no momento da semeadura da soja safras 2007/08 e 2008/09.

Para todas as profundidades testadas e nas duas ocasiões de amostragem, os dados ajustaram-se ao modelo exponencial de semivariograma, apresentando de moderada a forte dependência espacial, de acordo com os valores para ADE. Toledo et al. (2010), ao estudar variabilidade da FT em semeadora, na semeadura de amendoim sobre solo previamente preparado, também conseguiu ajuste dos dados de FT ao modelo exponencial, porém com anisotropia e dependência espacial moderada para esta variável.

Tabela 17. Parâmetros do semivariograma ajustados para força de tração em hastes sulcadoras de semeadora-adubadora.

Prof. haste	Modelo	C0	Co+C	Alcance	R ²	SQR	ADE
Semeadura da soja safra 2007/08							
6	Exp.	4380	8761	161	0,95	497987	0,50
9	Exp.	21820	43650	282	0,93	2,15x10 ⁷	0,50
12	Exp.	84700	169500	278	0,97	1,83x10 ⁸	0,54
Semeadura da soja safra 2008/09							
9	Exp.	62200	78180	99	0,59	7,64x10 ⁷	0,92
12	Exp.	219000	680000	213	0,68	1,45x10 ¹⁰	0,67
15	Exp.	200000	691300	237	0,58	1,44x10 ⁹	0,71

Prof. Haste; profundidade de sulcamento pela haste sulcadora, Exp.- modelo exponencial; C0 - efeito pepita; C0+C - patamar; R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrados dos resíduos; ADE - avaliador da dependência espacial (C/CO+C).

Com relação às variáveis referentes aos atributos químicos de solo (Tabela 18) observa-se, que à exceção do fósforo, na camada de 0 a 10 cm, que demonstrou dependência espacial moderada, todas as demais variáveis, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, apresentaram forte dependência espacial a julgar pelo valor do ADE. Os dados ajustaram-se ao modelo gaussiano para K, Al, MO e SMP (na camada 0 a 10 cm) e P, K, Ca, MO e pH (na camada de 10 a 20 cm). As demais variáveis, (P, Ca e V) na camada 0 a 10 cm no modelo esférico e Ca (0 a 10), Mg e Al⁺³ (10 a 20 cm) ao exponencial. Diversos autores têm considerado em seus estudos de variabilidade espacial atributos químicos de solo utilizados para inferências sobre o estado de fertilidade e a fim de correlacionar estes com a produtividade das culturas. Dentre estes pode-se citar Motomiya et al. (2006), com uma área de estudo de aproximadamente 90 ha, Júnior et al. (2010), em parcelas de 25 ha em dois locais de estudo, Junior et al. (2010), em 12,88 há, e Filho et al. (2010), em aproximadamente 3 hectares.

Dentre as variáveis químicas que apresentaram dependência espacial, o alcance ficou entre 152 m para Al⁺³ e 326 m para P, na camada de 0 a 10 cm.

Tabela 18. Parâmetros do semivariograma ajustados para variáveis químicas de solo avaliadas em duas profundidades.

Variáveis	Modelo	Co	CO+C	Alcance	R ²	SQR	ADE
Camada 0 a 10 cm							
P	Esf.	6,15	12,58	326	0,84	21,30	0,51
K	Gaus.	1,0	943	235	0,84	102294	0,99
Ca	Exp.	0,038	0,59	50	0,69	3,59x10 ⁻³	0,99
Mg	Efeito pepita puro						
Al ⁺³	Gaus.	0,003	0,093	152	0,89	6,4x10 ⁻⁴	0,89
MO	Gaus.	0,001	0,23	203	0,57	0,022	0,99
pH	Efeito pepita puro						
SMP	Gaus.	0,001	0,083	180	0,70	1,09x10 ⁻³	0,99
V	Esf.	0,1	83,36	162	0,38	1748	0,99
Sat. Al ⁺³	Efeito pepita puro						
Camada 10 a 20 cm							
P	Gaus.	0,010	2,99	180	0,747	59,6	0,99
K	Gaus.	1	970	220	0,745	226587	0,99
Ca	Gaus.	0,001	0,887	176	0,65	0,14	0,99
Mg	Exp.	0,0075	0,192	144	0,591	5,44.10 ⁻⁴	0,96
Al ⁺³	Exp.	0,55	4,497	111	0,07	8.98	0,88
MO	Gaus.	0,0001	0,092	252	0.893	5,66.10 ⁻⁴	0,99
pH	Gaus	0.023	0,38	213	0,74	1,75.10 ⁻³	0,83
SMP	Efeito pepita puro						
V	Efeito pepita puro						
Sat. Al ⁺³	Efeito pepita puro						

Esf.- modelo esférico; Exp.- modelo exponencial; Gau. – modelo gaussiano; C0 - efeito pepita; CO+C - patamar; R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrados dos resíduos; ADE - avaliador da dependência espacial (C/CO+C). P: fósforo (mg dm⁻³), K: potássio (mg dm⁻³), Ca: cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg: magnésio (cmol_c dm⁻³), Al⁺³: alumínio (cmol_c dm⁻³), MO: matéria orgânica %, pH: pH do solo em água, SMP: índice SMP, H + Al: acidez potencial, CTC: capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³), V: soma de bases (cmol_c dm⁻³), Sat. Al: saturação da CTC por Al⁺³ (%).

É intrigante o maior alcance para a variável P, pois isto significa maior homogeneidade na distribuição espacial, e conseqüentemente, com máxima distância de correlação espacial, o que normalmente não é comum para esta variável. Uma justificativa plausível para esta constatação deve-se à aplicação a lanço dos fertilizantes, o que ajuda na melhor distribuição, visto que o P

apresenta baixa mobilidade no solo, e com isso, ao ser aplicado em linha na semeadura, acaba causando variabilidade na sua distribuição espacial e gradientes de concentração, (Júnior et al., 2010). Estes autores, estudando a variabilidade espacial de macronutrientes em dois Latossolos, encontraram para o P o menor alcance em relação aos demais estudados. Vieira et al. (2010), investigando variabilidade espacial de teores de nutrientes foliares em soja, encontraram o menor alcance para P (36 m) em relação aos demais avaliados, numa parcela de 1,92 ha (120 x 160 m).

Assim como ocorreu para o P, todos os demais nutrientes que são aplicados por meio de fertilizações, como o K, ou em correção de acidez, como o Ca e Mg contidos em calcário, apresentaram estrutura de dependência espacial, mesmo aplicados em formulados de adubos e a lanço. Isto é indicativo que outros fatores interferiram na disponibilização e absorção, e desta forma afetando o estado nutricional da cultura, no caso a soja.

Dessa forma, a utilização da média destes nutrientes no solo, não permitiria explicar a variabilidade no desempenho produtivo da soja, conforme Tabela 19 e Figura 18 A. A mesma constatação foi feita por Vieira et al. (2010), com relação a os teores de nutrientes foliares na cultura da soja, em Latossolo.

De acordo com os dados da Tabela 19, relacionados aos atributos de soja (produtividade, plantas por m², número de legumes por planta e massa de mil grãos), observa-se que os valores para produtividade ajustaram-se a o modelo exponencial (Apêndice 10) enquanto que para número de legumes por planta e massa de mil grãos ajustaram-se ao modelo esférico. A variável plantas por m² não apresentou estrutura de dependência espacial, com efeito pepita puro (Tabela 19 e Apêndice 10). O ADE foi moderado para produtividade e massa de mil grãos e forte para número de legumes por planta. O alcance foi maior para massa de mil grãos (506m) comparada aos atributos número de legumes por planta, com 34 m e produtividade com 108 m. Vieira et al. (2010), estudando variabilidade da produtividade de soja em 1,92 ha, obteve ajuste ao modelo esférico, com alcance de 60 m e moderada dependência espacial.

Tabela 19. Parâmetros do semivariograma ajustados para produtividade de soja (RG) em kg ha⁻¹, número de plantas por m² (P/m²), número de legumes por planta (L/P) e massa de mil grãos (MMG) em g.

Variáveis	Modelo	Co	C0+C	Alcance	R ²	SQR	ADE
RG	Exp.	64200	128500	108	0,93	1,2x10 ⁻⁸	0,50
P/m ²	Efeito pepita puro						
L/P	Esf.	0,200	60,70	34	0,61	388	0,99
MMG	Esf.	32,5	68,6	506	0,87	193	0,53

Exp.- modelo exponencial; C0 - efeito pepita; C0+C - patamar; R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrados dos resíduos; ADE - avaliador da dependência espacial (C/CO+C).

6.3.3 Variabilidade espacial das diferentes variáveis em estudo em sistema de integração lavoura-pecuária.

Nas Figuras 9 a 17, são apresentados os mapas de contorno expressando a variabilidade espacial das diferentes variáveis abordadas neste estudo. Os mapas contemplam, além da variabilidade espacial, delimitada por isolinhas dos valores das diferentes variáveis abordadas, as divisões de parcelas, com os tratamentos e repetições. A área de 21,3 hectares apresenta-se subdividida em 12 parcelas, ordenadas por numeração sequencial de P1 a P12, conforme Figura 8 (Capítulo 4), mais as faixas sem pastejo. Desta forma facilita a visualização da distribuição espacial das diferentes variáveis estudadas em relação à localização dos tratamentos (alturas médias da pastagem), que supostamente introduzem variabilidade à área, conduzida no sistema de integração lavoura-pecuária.

6.3.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração

Na Figura 9 encontram-se os mapas de resistência mecânica do solo à penetração, gerados a partir de dados obtidos no final do período de pastejo (novembro 2007), momento em que foi implantada a cultura da soja.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi usada para explorar espacialmente o efeito do pisoteio animal sobre a estrutura do solo, objetivando diagnosticar algum nível de desestruturação e compactação do solo. A RP foi apresentada para três camadas de solo, 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, correspondendo aos mapas A, B e C das Figuras 9 e 10, respectivamente. Observando os mapas A e B fica claro o efeito da compactação exercida pelos

animais sobre o solo a se expressar na camada superficial (0 a 10 cm) quando comparada a camada subsequente, 10 a 20 cm, onde o mapa de contorno mostra menores valores de RP. Este resultado corrobora com aqueles encontrados por Albuquerque, et al. (2001), e Conte et al. (2008). Em condições naturais no solo ocorre o contrário, pois à medida que aumenta a profundidade os valores de RP encontrados são maiores. Assim, dever-se-ia ter uma sequência de mapas com elevação das regiões mais escuras, devido à forma que foram apresentados os mapas, com a mesma legenda para as diferentes profundidades. No entanto, têm-se o mapa A da Figura 9, com maior proporção de área com valores de RP maiores, comparado ao mapa B. Desta forma, foi possível separar a profundidade na qual se tem a expressão do pisoteio animal e seus impactos sobre a estrutura do solo. Diversos autores têm investigado impactos de bovinos ao solo em sistema de integração lavoura-pecuária, e normalmente a conclusão formulada é de que os efeitos são encontrados superficialmente (Cassol 2003, Flores, et al. 2007), no entanto, Spera et al. (2009), concluíram que não ocorre compactação superficialmente, devido a pisoteio animal.

De fato, são encontradas alterações nos atributos físicos de solo investigados, mas a intensidade que as mesmas ocorrem nem sempre caracterizam compactação do solo. Fato este que pode ser comprovado pelos valores da RP encontrados neste trabalho, que são relativamente baixos em relação aos valores que são normalmente tomados como críticos. Complementarmente tem-se que a RP quando avaliada, no momento da colheita da soja, e sendo assim após quatro meses e meio, o que se encontrou foi que na camada superficial (0 a 10 cm) a RP não mais apresenta valores superiores a camada inferior (10 a 20 cm), conforme pode ser visto na Figura 10 A e B, respectivamente. Na Figura 10, a RP se apresenta com valores crescentes à medida que se avalia camadas sucessivas de solo (Figura 11 A, B e C), sendo este o comportamento normal desta variável.

Diante dos mapas de variabilidade espacial da variável RP, após a colheita da soja (Figura 10), é possível perceber na visualização das isolinhas que definem os contornos de valores de RP, confrontadas com as divisões de parcelas do experimento, que as regiões que apresentaram maiores valores para esta variável não têm os mesmos limites das parcelas onde ocorreu maior

pressão de pastejo (P10 e P20), com menor altura do pasto e mais animais por área. No entanto, na Figura 9 A, referente a camada 0 a 10 cm após o pastejo e antes da semeadura da soja, observa-se que a maior parte das regiões do mapa com valores mais elevados para RP, estão inseridas nas áreas de parcelas cuja altura média de manutenção da pastagem é 10 e 20 centímetros, o que representa maior aplicação de pressão ao solo pelo efeito do pisoteio animal. No entanto, esta observação só pode ser feita para o mapa A da Figura 9. Todos os demais mapas referentes à RP sejam os da mesma ocasião de amostragem (final do pastejo) ou no momento da colheita (Figura 10), as regiões dos mapas que apresentaram maiores valores para RP apresentam-se aleatoriamente, independente da divisão dos tratamentos. Com isso, resta pensar que a variável RP, à exceção da camada 0 a 10 cm, avaliada no final do período de pastejo (Figura 9 A), tem sua distribuição espacial mais fortemente ligada a outros fatores do que os tratamentos em questão, que se aplicam sobre a área experimental, como por exemplo, uso anterior deste experimento, tráfego de rodados de máquinas e caminhões.

A avaliação de alterações nas condições físicas do solo por meio da RP é mais prática que as avaliações de densidade e porosidade do solo. No entanto, a avaliação da RP é fortemente dependente do conteúdo de água no solo. Elevados teores de água no solo podem reduzir acentuadamente os valores absolutos da medida de RP. Os valores encontrados para RP no presente estudo podem ser considerados baixos, comparados às avaliações em anos anteriores no mesmo experimento (Conte et. al., 2007), o que pode ser atribuído ao elevado conteúdo de água no solo, que, na média dos tratamentos para a profundidade de amostragem até 30 cm, ficou em 250 g kg^{-1} na avaliação de novembro/2007 e em 270 g kg^{-1} na avaliação de abril/2008, na camada 0 a 20 cm. O elevado conteúdo de água do solo também contribuiu para amenizar as diferenças entre os tratamentos, não sendo possível distinguir com clareza, nos mapas de RP, diferenças entre os tratamentos nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm.

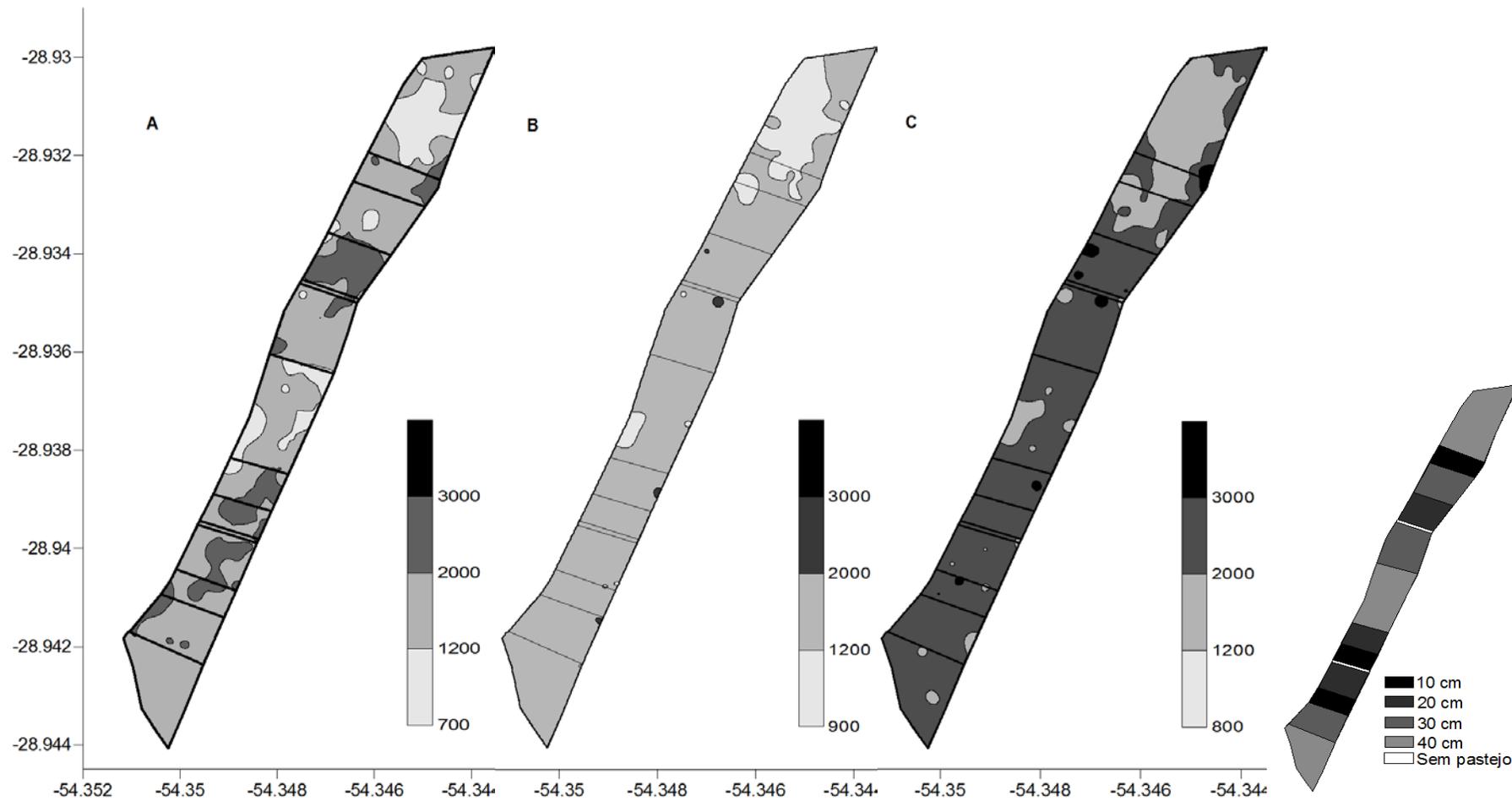


Figura 9. Distribuição espacial da resistência mecânica do solo à penetração (kPa) avaliada no final do período de pastejo e antes da semeadura da soja, (novembro de 2007), em sistema de integração lavoura-pecuária, em três profundidades: A (0 a 10), B (10 a 20) e C (20 a 30) cm.

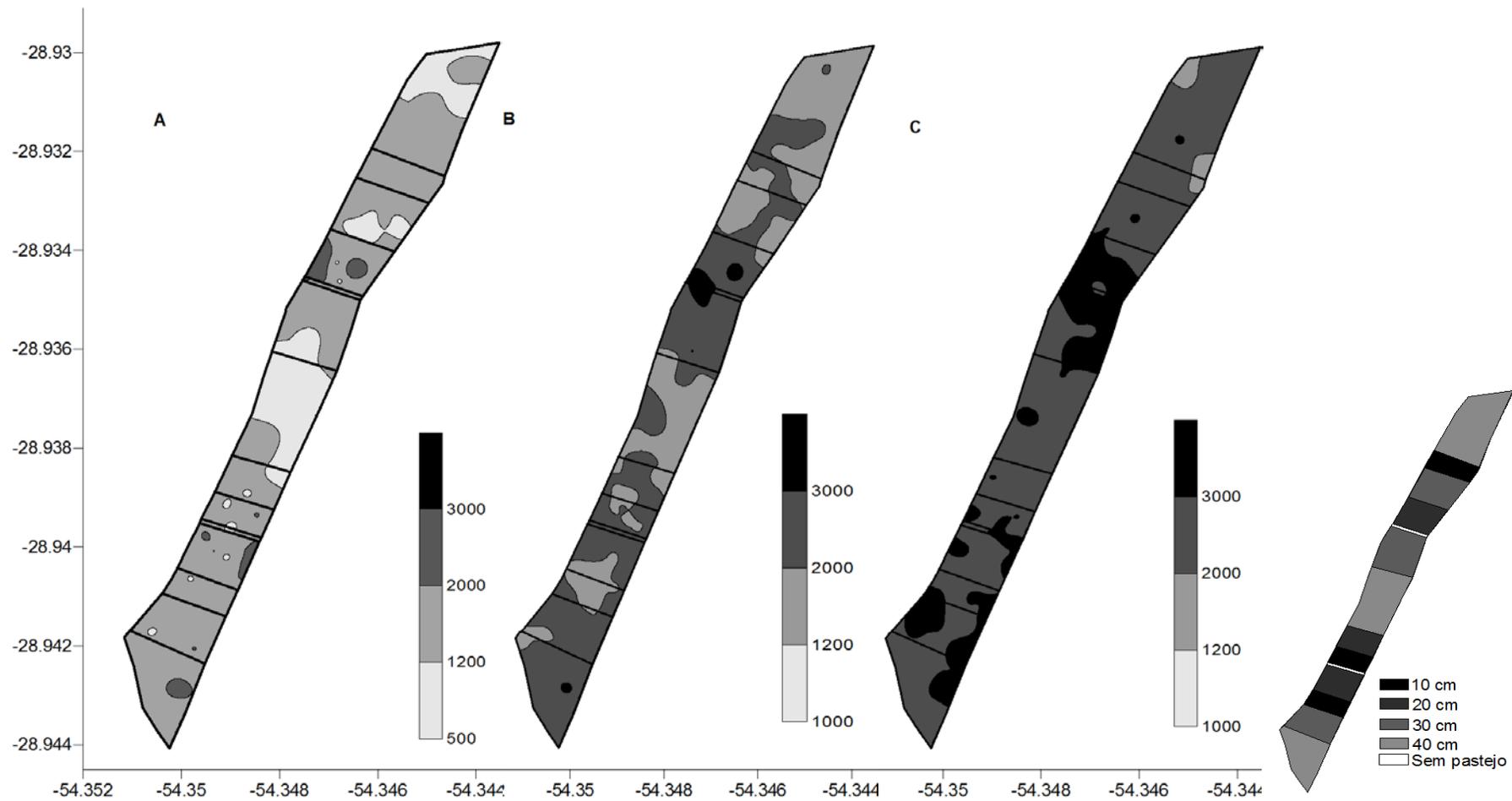


Figura 10. Distribuição espacial da resistência mecânica do solo à penetração (kPa) avaliada no momento da colheita da soja, (abril de 2008), em sistema de integração lavoura-pecuária, em três profundidades: A (0 a 10), B (10 a 20) e C (20 a 30) cm.

6.3.3.2 Força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras

A força de tração é uma variável medida em máquinas agrícolas, proveniente da interação da máquina com o solo. Neste caso, em semeadoras-adubadoras, representa a força necessária para tracionar um sulcador do tipo haste através do solo, proporcionando sua ruptura e mobilização, dando origem ao sulco de semeadura. O uso de hastes como sulcador em semeadoras tem o intuito de ampliar a área e, conseqüentemente, o volume de solo mobilizado na linha de semeadura, justamente para amenizar problemas de compactação ou condição inadequada da estrutura física do solo para o bom desenvolvimento de plantas. Sendo assim, a quantificação da força necessária para tracionar uma haste pode ser usada para se fazer inferências quanto ao estado físico do solo, em relação à compactação. Esta variável apresenta boa correlação com outros indicadores da condição física do solo, como a resistência mecânica do solo à penetração (Desbiolles et al., 1999, Conte et al., 2007, Conte et al., 2008)

Este tipo de aplicação é adequada principalmente quando se tem uma área com homogeneidade de solo, mas submetida a diferentes manejos que possam implicar alteração da estrutura do solo. Neste caso, onde a área experimental é subdividida em parcelas com diferente lotação animal (número de animais por área) a fim de se alcançar as alturas da pastagem propostas como definidoras dos tratamentos, constitui condição ideal de aplicação dessa variável para investigação de possíveis impactos ao solo oriundos da presença de animais. Aplicações dessa ferramenta já são conhecidas, conforme trabalho de Glancey et al. (1996), Neményi et al. (2006), Adamchuk & Molin (2006) e Toledo et al. (2010).

Os mapas das Figuras 11 e 12 mostram o comportamento espacializado da força de tração medida em hastes sulcadores operando em diferentes profundidades, em duas ocasiões, semeadura da soja safra 2007/08 (Figura 11) e safra 2008/09 (Figura 12). Na Figura 11, os mapas A, B e C correspondem às profundidades de atuação da haste sulcadora de 6, 9 e 12 cm, respectivamente, enquanto na Figura 13 representam profundidades de atuação de 9, 12 e 15 cm, respectivamente.

Ao confrontar os mapas de FT obtida para hastes operando em

diferentes profundidades, na mesma ocasião, percebe-se um aumento da FT requerida. A elevação na demanda de FT com aumento na profundidade não é linear com o aumento de profundidade de atuação. Este comportamento é explicado em parte pela presença do disco de corte que antecede a haste sulcadora. O disco de corte, que tem a função de cortar os resíduos vegetais na superfície do solo, acaba facilitando o rompimento de solo pelo sulcador, devido ao corte realizado também na superfície do solo, o que pode ultrapassar a 5 cm de profundidade. Esse corte na estrutura do solo representa um ponto de fraqueza para o rompimento do solo pela passagem da haste sulcadora, onde a partir desse dá-se o rompimento da estrutura. Muitas vezes na observação a campo é possível perceber que o rompimento do solo pela passagem da haste sulcadora ocorre apenas para um lado, a partir da fratura proporcionada pelo disco de corte. Com isso o sulco ao invés de ter um formato aproximadamente em "V", apresenta uma lateral com ângulo reto (90°) e a outra rompendo em aproximadamente 45° , o que normalmente deveria ocorrer para as duas laterais do sulco (Wheeler & Godwin, 1996).

Mas a implicação na demanda de FT, é que a mesma é diminuída pela passagem prévia do disco de corte. Com isso, a magnitude dessa redução na demanda de FT se expressa mais quando a haste sulcadora opera em menor profundidade, já que a profundidade alcançada pelo disco de corte é fixa e as hastes podem ser reguladas para operarem em diferentes profundidades.

Quanto à distribuição espacial da FT, o que pode se observar é que a mesma não apresenta uma distribuição espacial explicada pelos tratamentos presentes na área experimental. Assim como a RP, a distribuição das isolinhas definindo os contornos com regiões de mesmos valores para FT, não apresentam nenhuma correlação com as divisões dos tratamentos (Figuras 11 e 12). As regiões dos mapas com maiores valores para essa variável são totalmente aleatórias em relação à localização dos tratamentos que poderiam ter proporcionado maior desestruturação física do solo, no caso, onde a intensidade de pastejo foi maior (menores alturas da pastagem). Quando se busca a localização das manchas com maior demanda de FT no mapa, em relação à localização dos tratamentos (Figura 8) é possível verificar que as mesmas encontram em parte inseridas nas parcelas com menores alturas da pastagem (10 e 20 cm). Mas de qualquer forma, representam apenas uma

proporção da parcela, e essa constatação leva a crer que a distribuição de zonas com maior demanda de FT esteja mais fortemente ligada a outros fatores de solo do que os tratamentos principais, no caso altura da pastagem. Constatação semelhante foi elaborada para a variável resistência à penetração. Para Toledo et al. (2010) a força de tração em semeadora e resistência mecânica do solo à penetração não apresentaram correlação espacial.

Áreas com mesma interpretação para os valores das variáveis RP e FT, e por estas estarem ligadas a condição física de solo poderiam ser tomadas como unidades ou zonas de manejos diferenciados (Molin 2002, Filho et al., 2010). Para o caso deste experimento com ILP, zonas com elevados valores de RP ou FT, relacionadas aos tratamentos ou não poderiam ser tratadas de forma diferente, principalmente se viessem a apresentar correlação com menor produtividade de soja. Uma possível interferência, neste caso, seria por meio de ações mecânicas no solo, como preparo com escarificador, equipamento usado na descompactação de solo.

O comportamento dos animais em pastejo quanto a seus hábitos sociais, interagindo com os animais confinados nas demais parcelas podem definir zonas preferenciais de tráfego ou de sua permanência por maior período (Baggio, et al., 2006). Este fator acaba por interagir com os demais para definição de áreas com fatores de solo influenciados pelo pisoteio animal, como é para a RP e a FT. O tráfego dos animais, somado ao de máquinas agrícolas nas operações necessárias para o manejo do sistema, são os principais fatores que atuam no solo e que podem interferir negativamente na condição física, com perda da qualidade de estrutura do solo e compactação.

Com relação às zonas que apresentaram maior demanda de força de tração nas hastes da semeadora, é possível se fazer uma analogia com relação desempenho operacional de máquinas agrícolas. Teoricamente, diante de maior demanda de tração do equipamento, é preciso maior potência do trator para tracioná-lo, e essa é obtida pela redução da velocidade operacional, o que vem a diminuir a capacidade de campo efetiva, ou aumento da rotação do motor e conseqüentemente, do consumo de combustível. O consumo específico de combustível não se confirmou com o aumento da força de tração, conforme estudos de Toledo et al. (2010), usando biodiesel etílico na mistura de 5%.

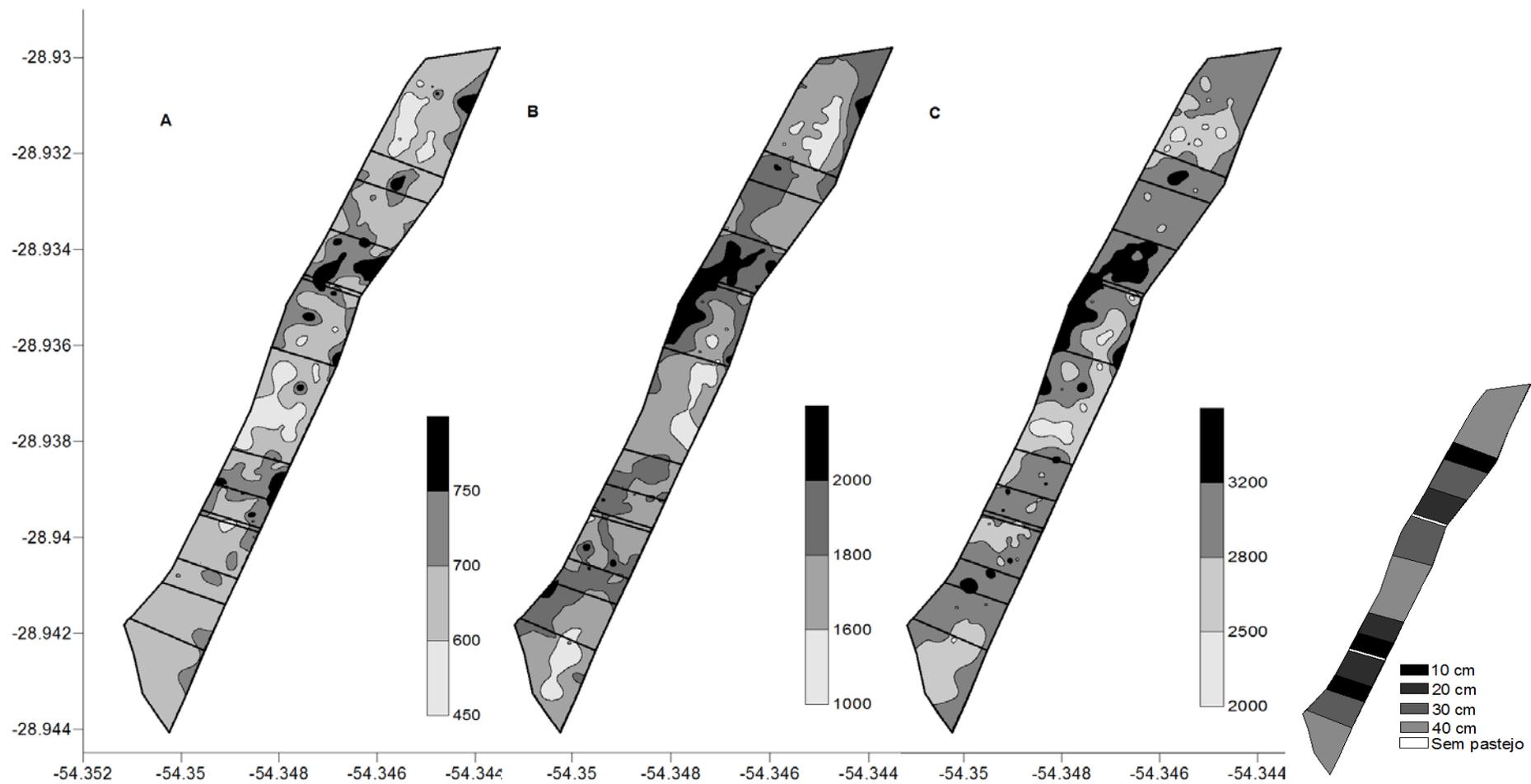


Figura 11. Distribuição espacial da força de tração em haste sulcadora avaliada na semeadura da soja safra 2007/08 em três profundidades de trabalho de haste sulcadora: A (6), B (9) e C (12) cm.

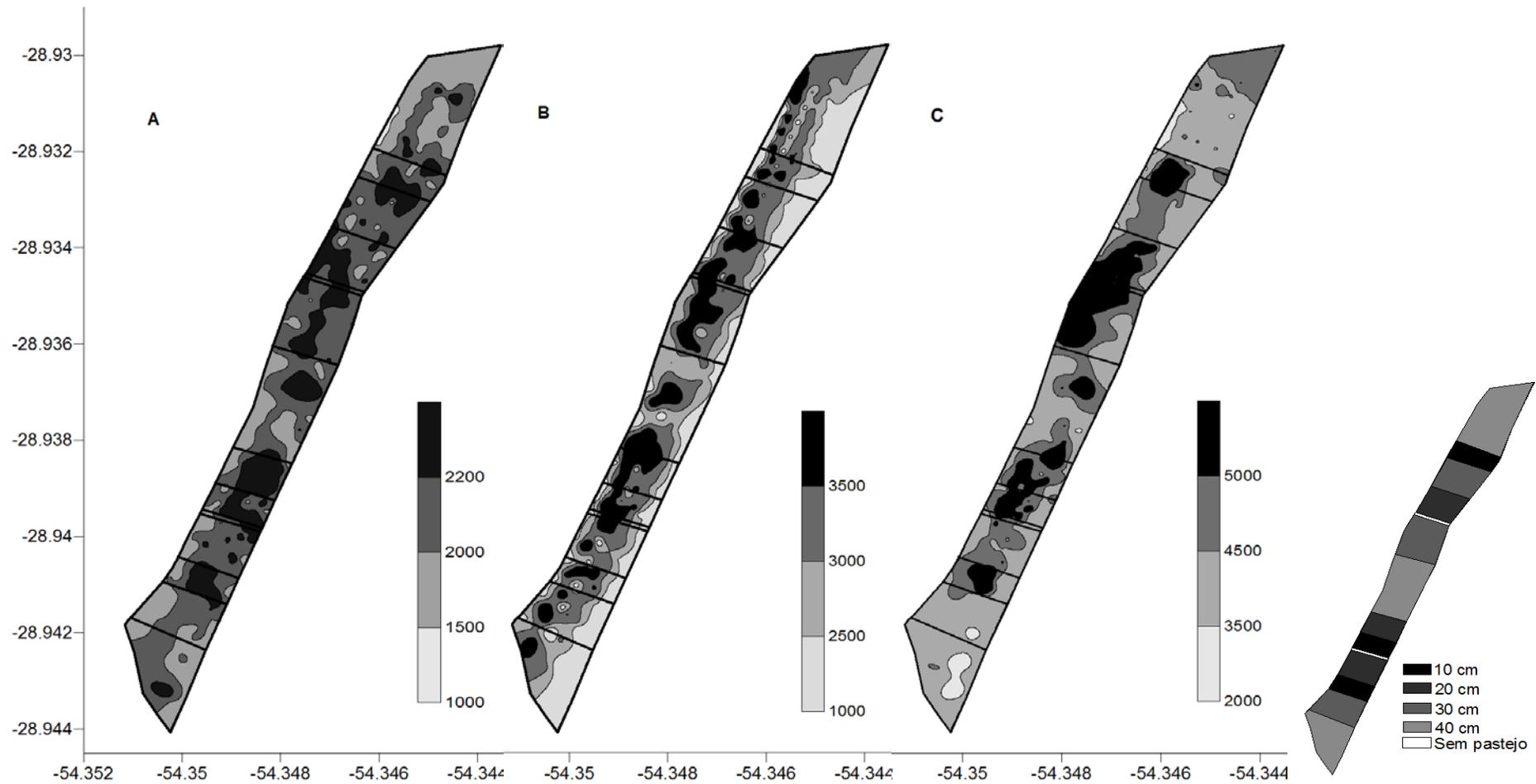


Figura 12. Distribuição espacial da força de tração em haste sulcadora avaliada na semeadura da soja safra 2008/09 em três profundidades de trabalho de haste sulcadora: A (9), B (12) e C (15) cm.

6.3.3.3 Atributos químicos de solo

Nas Figuras 13 a 16, são apresentados os mapas com a distribuição espacializada de diversos atributos químicos de solo em relação à distribuição dos tratamentos altura da pastagem no sistema de integração lavoura-pecuária. Os diferentes atributos químicos analisados foram apresentados na forma de mapas de distribuição espacial, de acordo com a profundidade de amostragem e obedecendo aos mesmos intervalos de distribuição nas diferentes camadas para gerar os mapas. Na Figura 13, são encontrados os teores de fósforo e potássio, para as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Os mapas A e B (Figura 13) representam as duas profundidades para o teor de fósforo, e os mapas C e D os teores de potássio.

Para a distribuição espacial do P, observam-se teores mais elevados e distribuição mais uniforme na superfície (0 a 10 cm), onde a maior parte da área apresentou teores superiores a 12 mg dm^{-3} , em relação à camada subsequente (10 a 20 cm), onde os teores ficaram em maior parte entre 6 e 12 mg dm^{-3} . De acordo com CMFS-RS/SC, (2004), para o P, os valores na camada superficial encontram-se no nível alto, e de 10 a 20 cm apresentam níveis médio a alto. Para o P é esperado a formação de gradientes verticais no solo, visto a baixa mobilidade apresentada por esse elemento no solo, conforme demonstrado por Júnior et al. (2010). Na camada superficial é comum ser encontrado maior variabilidade espacial para o P visto sua aplicação em linhas na semeadura, associado a sua baixa mobilidade, de acordo com resultados obtidos por Costa e al. (2010). No entanto, neste estudo, a julgar pelo alcance obtido na dependência espacial, a camada superficial (0 a 10 cm) apresentou menor variabilidade proporcionando maior alcance (326 m) que na camada subsequente (180 m).

O potássio apresentou maior variabilidade espacial em relação ao P, com distribuição dos teores em diferentes classes, tanto na camada superficial (0 a 10 cm) como em subsuperfície (10 a 20 cm), mas com teores mais elevados na superfície. A dependência espacial foi similar entre as duas camadas analisadas, obtendo alcance semelhantes, 235 e 220 m respectivamente. Em estudos de variabilidade espacial normalmente são encontrados para o K maior descontinuidade espacial em relação a outros

elementos, como P, Ca e Mg, conforme demonstrado por Motomuya et al. (2006) e Junior et al. (2010). A interpretação dos teores de K apresentados, segundo CQFS-RS/SC, (2004), classifica em níveis de médio, alto e muito alto na camada superficial (0 a 10 cm) e médio a alto na camada 10 a 20 cm.

Na Figura 14 apresentam-se os mapas para a distribuição espacial dos teores de cálcio e magnésio, sendo que o cálcio apresentou dependência espacial para as duas profundidades amostradas e o magnésio somente para a profundidade de 10 a 20 cm (Apêndice 6). Sendo assim, são apresentados os respectivos mapas para as duas variáveis, onde se observa que o cálcio apresenta maiores teores comparado ao magnésio, e na camada superficial (0 a 10 cm). No entanto, os teores são considerados altos na camada superficial e médio e alto na camada de 10 a 20 cm. Sabendo-se que esses macronutrientes são adicionados ao sistema principalmente por meio da aplicação de calcário, e que a última aplicação na área ocorreu em 2001 (Cassol, 2003), os teores são elevados e atendem as necessidades das culturas. Mesmo com a aplicação ocorrendo em superfície, o deslocamento desses nutrientes ocorreu no solo, e segundo Flores (2008), o efeito em profundidade atinge cerca de 2,5 cm ao ano.

No entanto, o efeito de elevação de pH do solo, neutralização de alumínio e elevação da saturação por bases na CTC, que são os principais efeitos buscados com aplicação de calcário já não satisfazem, observando-se valores baixos de pH, elevada presença de alumínio e baixa saturação por bases na CTC do solo (Figuras 15 e 16). De acordo com a Figura 16 A e B é possível perceber que a presença de alumínio na forma tóxica às plantas, sofre substancial incremento da camada superficial (0 a 10 cm) para a camada de 10 a 20 cm. Isto é reflexo do baixo valor de pH no solo nesta camada, conforme pode ser visto na Figura 16 A e também o índice SMP (Figura 16 B) que serve de indicador da necessidade de calcário, de acordo com as recomendações da CQFS-RS/SC, (2004). Pontelli (2006), em aplicação de agricultura de precisão, verificou baixa correlação de atributos químicos de solo com a produtividade das culturas, a exceção do fósforo e da matéria orgânica do solo. Neste trabalho, foi verificado que a matéria orgânica do solo apresenta diferença entre as camadas de solo analisadas (0 a 10 e 10 a 20 cm), conforme pode ser visto por meio dos mapas da Figura 15. O elevado conteúdo de carbono

constatado na camada superficial favorece as relações de troca e suprimento de nutrientes às plantas, além de amenizar efeito de elementos tóxicos como o Al^{3+} . Assim, é possível que a matéria orgânica do solo esteja amenizando o efeito da elevada presença de Al^{3+} e com isso contribuindo para a manutenção da produtividade da pastagem e principalmente da soja, como pode ser constatado pela produtividade da soja (Figura 18 A).

Os tratamentos que preconizam a menor altura de manutenção da pastagem (10 e 20 cm), mas principalmente a menor altura, poderiam estar comprometendo a sustentabilidade do sistema, principalmente com redução no teor de matéria orgânica do solo (Souza et al., 2008). No entanto, essa constatação não pode ser feita com base no mapa de distribuição espacial da matéria orgânica do solo na camada 0 a 10 cm, conforme Figura 15. As áreas com menor conteúdo de matéria orgânica no mapa não são restritas às parcelas com menor altura de pasto, e sim apresentam-se aleatórias. Podem sim estar associadas ao fator relevo e uso passado da área, presença de erosão ou outros fatores de natureza desconhecida.

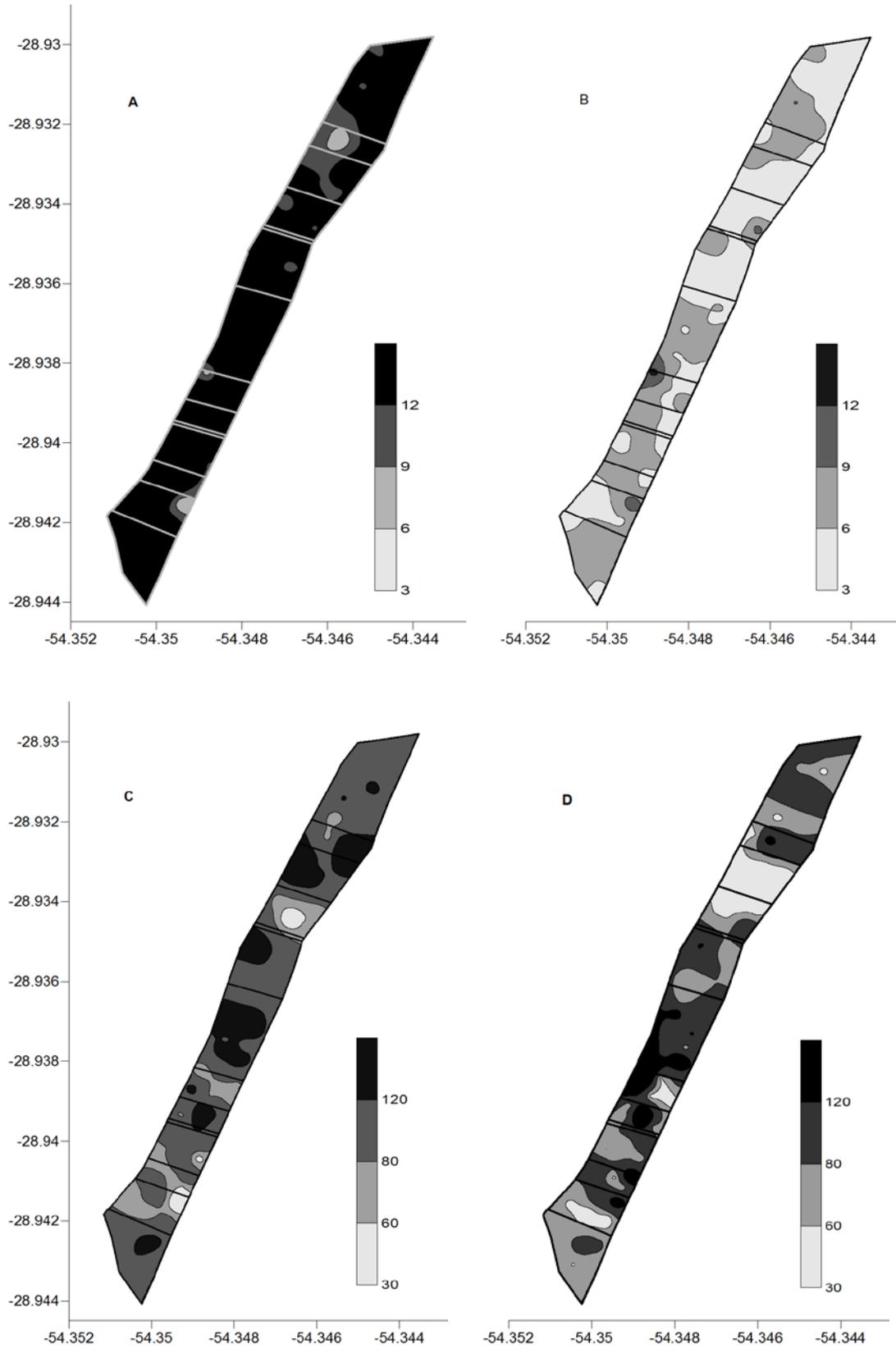


Figura 13. Distribuição espacial dos teores de fósforo (mg dm^{-3}) no solo, nas camadas 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B), e potássio (mg dm^{-3}) na camada 0 a 10 cm (C) e 10 a 20 cm (D).

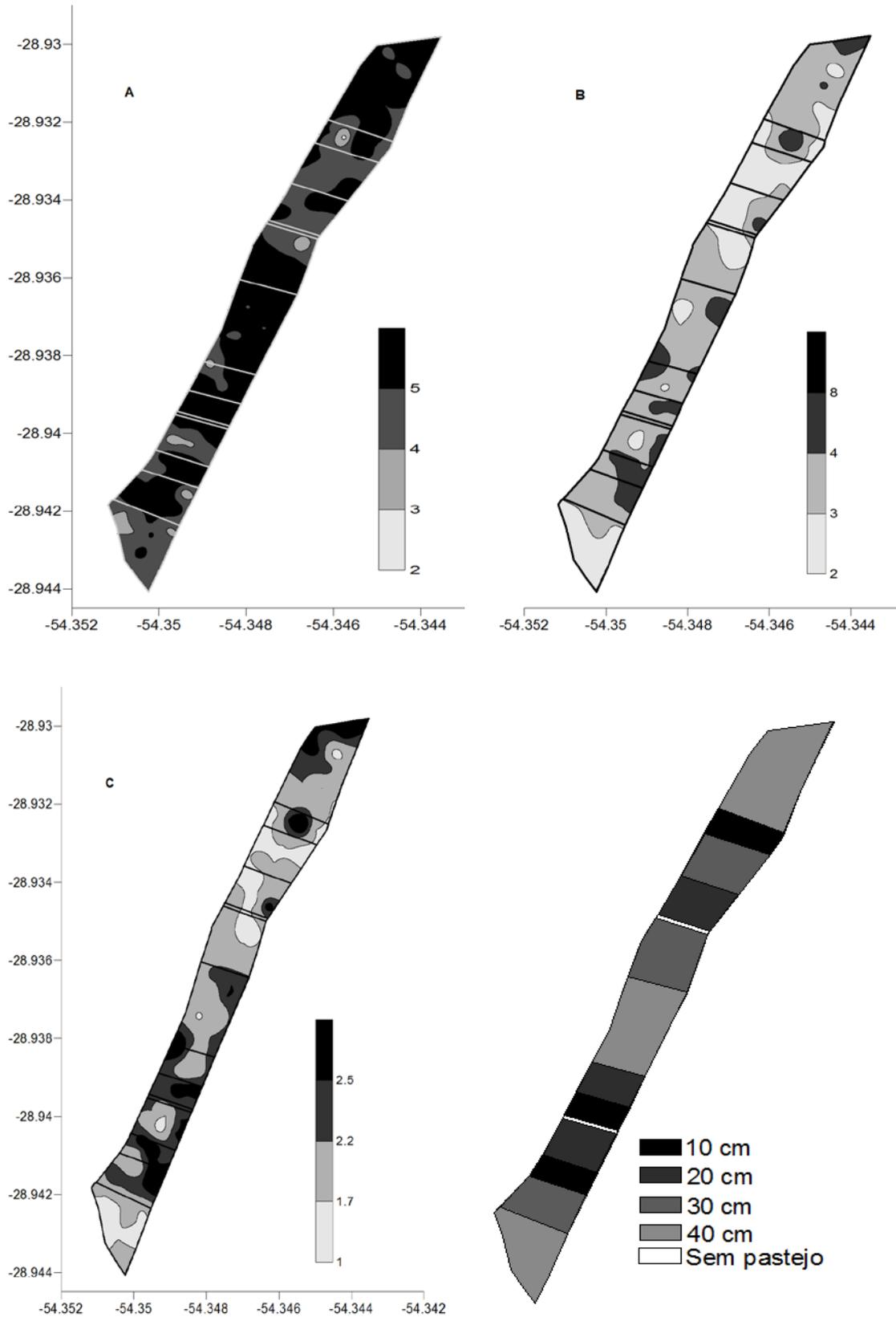


Figura 14. Distribuição espacial dos teores de cálcio (mg dm⁻³) no solo nas camadas 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B), e o teor de magnésio (mg dm⁻³) na camada de 10 a 20 cm(C).

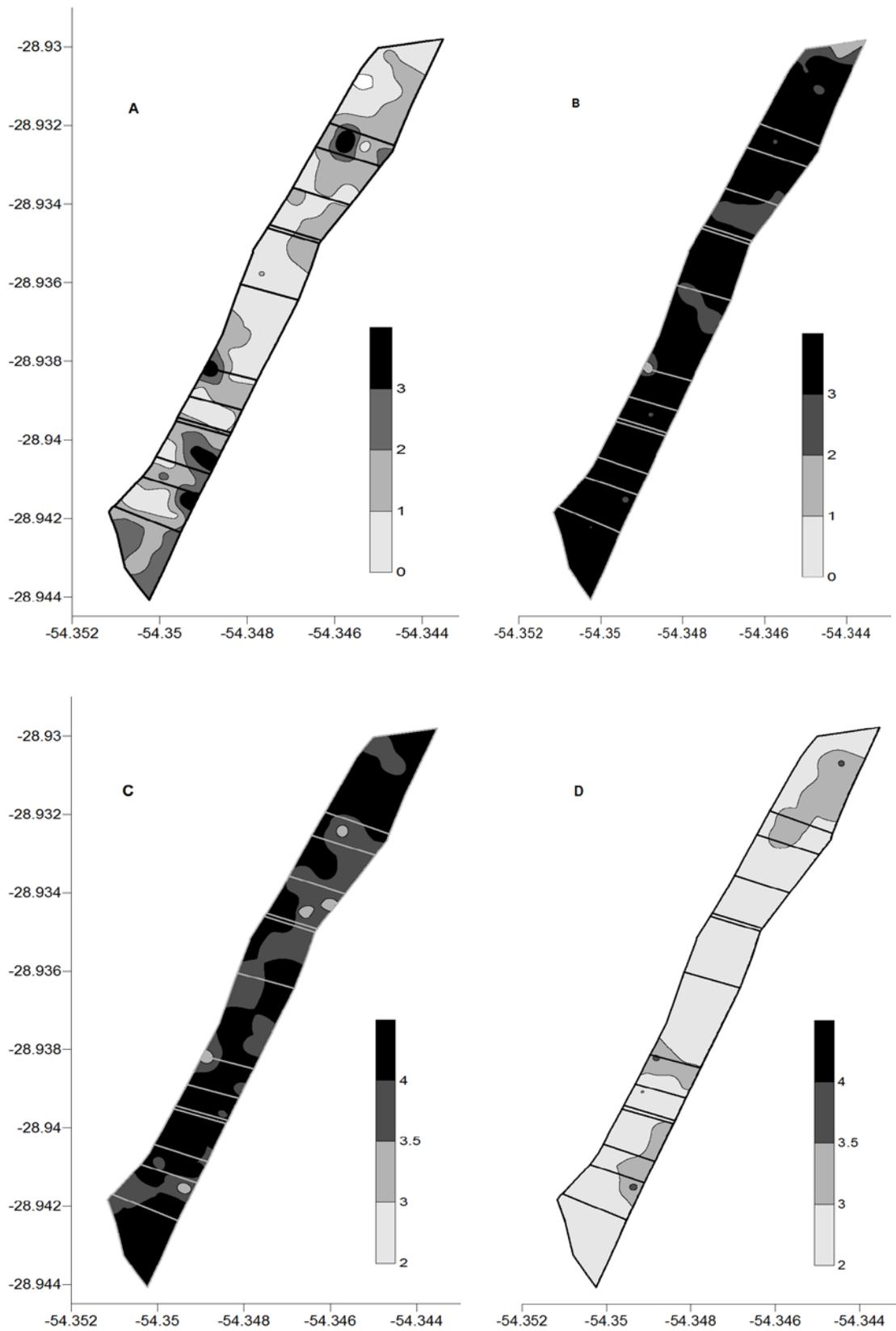


Figura 15. Distribuição espacial dos teores de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) nas camadas de 0 a 10 (A) e 10 a 20 cm (B), e matéria orgânica do solo (%) nas camadas 0 a 10 (C) e 10 a 20 cm (D).

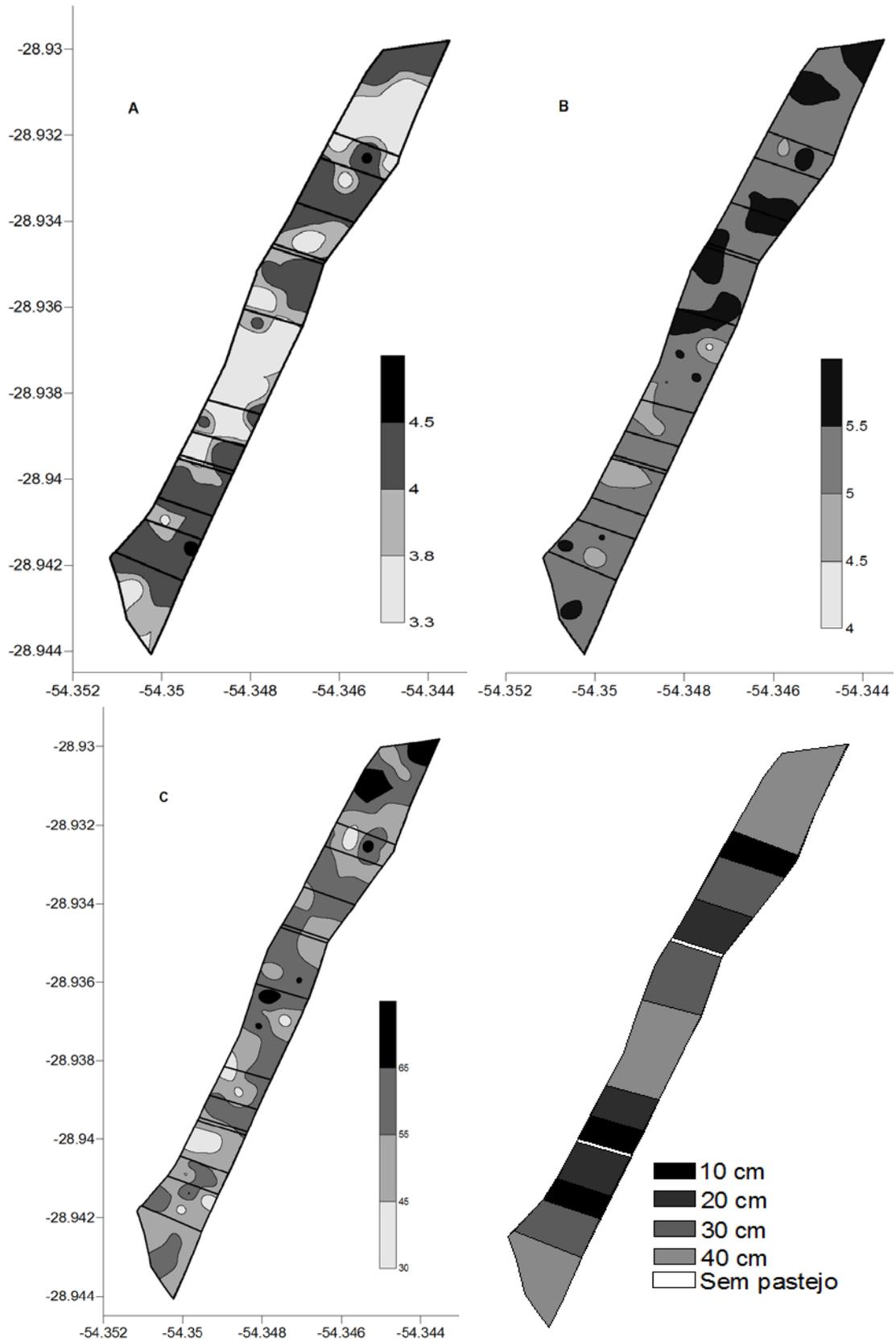


Figura 16. Distribuição espacial do pH do solo na camada 10 a 20 cm (A); SMP na camada 0 a 10 cm (B) e saturação da CTC por bases (%) (C).

6.3.3.4 Produtividade, número de legumes por planta e massa de mil grãos de soja

Para as variáveis de planta, neste caso a cultura da soja, onde se investigou a distribuição espacial da produtividade, o número de plantas por área e legumes por planta e a massa de mil grãos, as três variáveis que apresentaram dependência espacial são mapeadas na Figura 17. Esta expressa a distribuição espacial da produtividade (kg ha^{-1}), no mapa B o número de legumes por planta e no C a massa de mil grãos de soja. As variáveis da Figura 17 B e C e mais a população de plantas, que neste caso não apresentou dependência espacial (Apêndice 10), são componentes de produção utilizados para explicar o desempenho produtivo da cultura da soja. O componente número de legumes por planta é o que normalmente sofre influência de fatores relacionados aos manejos aplicados ao solo e à cultura (Rambo et al., 2004) e a massa de mil grãos é considerado um fator fortemente controlado por genes, que o deixa dependente do genótipo (Rambo et al., 2003), assim como o número de grãos por legume. Desta forma, o mapa B deveria apresentar melhor correlação com o mapa A do que o mapa C (Figura 17). Mas na visualização dos mapas não é possível fazer essa constatação, e o que ocorre é que o mapa C (massa de mil grãos) se assemelha mais ao mapa A (produtividade). Ou seja, o maior massa de grãos parece explicar melhor a produtividade final da soja do que o número de legumes por planta, contrariamente ao que normalmente ocorre. No entanto, ao expressar as diferentes variáveis relacionadas como componentes do produtividade na forma de correlação, observa-se um comportamento linear, onde nenhuma variável correlaciona-se com o produtividade da soja (Figura 18). Mas ao se fazer qualquer inferência sobre uma variável como produtividade de uma cultura deve-se ter muita cautela, pois esta pode estar sendo influenciada por diversos fatores, sendo o resultado do somatório da interação de diferentes variáveis. Neste estudo, foram abordadas algumas variáveis (RP, FT e atributos químicos de solo) que usualmente são escolhidas em estudos dessa natureza, pois em muitos casos são as que permitem obter mais altos coeficientes de correlação com o desempenho das culturas. No entanto, Molin et al. (2007) encontrou maior influência da população de plantas do que atributos de solo sobre a produtividade de milho. Já Vieira et al. (2010)

encontrou relação espacial da produtividade de soja com atributos físicos de solo e químicos na análise foliar.

A observação dos mapas dos diferentes atributos analisados não permite fazer inferências que possam explicar a distribuição espacializada da produtividade de soja conforme a mesma se apresentou. Em relação aos atributos físicos de solo, relacionados à compactação de solo, como a RP e FT não há coincidência entre as áreas com maiores valores para essas variáveis e as regiões com menor produtividade da soja. De fato, ao se observar pelos valores de RP, os mesmos apresentam-se baixos para indicar um estado de compactação capaz de comprometer o desempenho da soja.

Ao se buscar uma correlação da distribuição espacial da produtividade de soja com teores de macronutrientes ou os demais atributos de solo abordados também não se consegue chegar a uma relação capaz de explicar que determinado atributo esteja definindo o desempenho da soja. De certa forma, isto ocorre, pois os teores presentes no solo são considerados médios a altos, satisfazendo a cultura. Dentre os que poderiam comprometer a cultura da soja são o pH, SMP, Al^{3+} e saturação por bases, mas de fato essa correlação não se apresenta nos mapas.

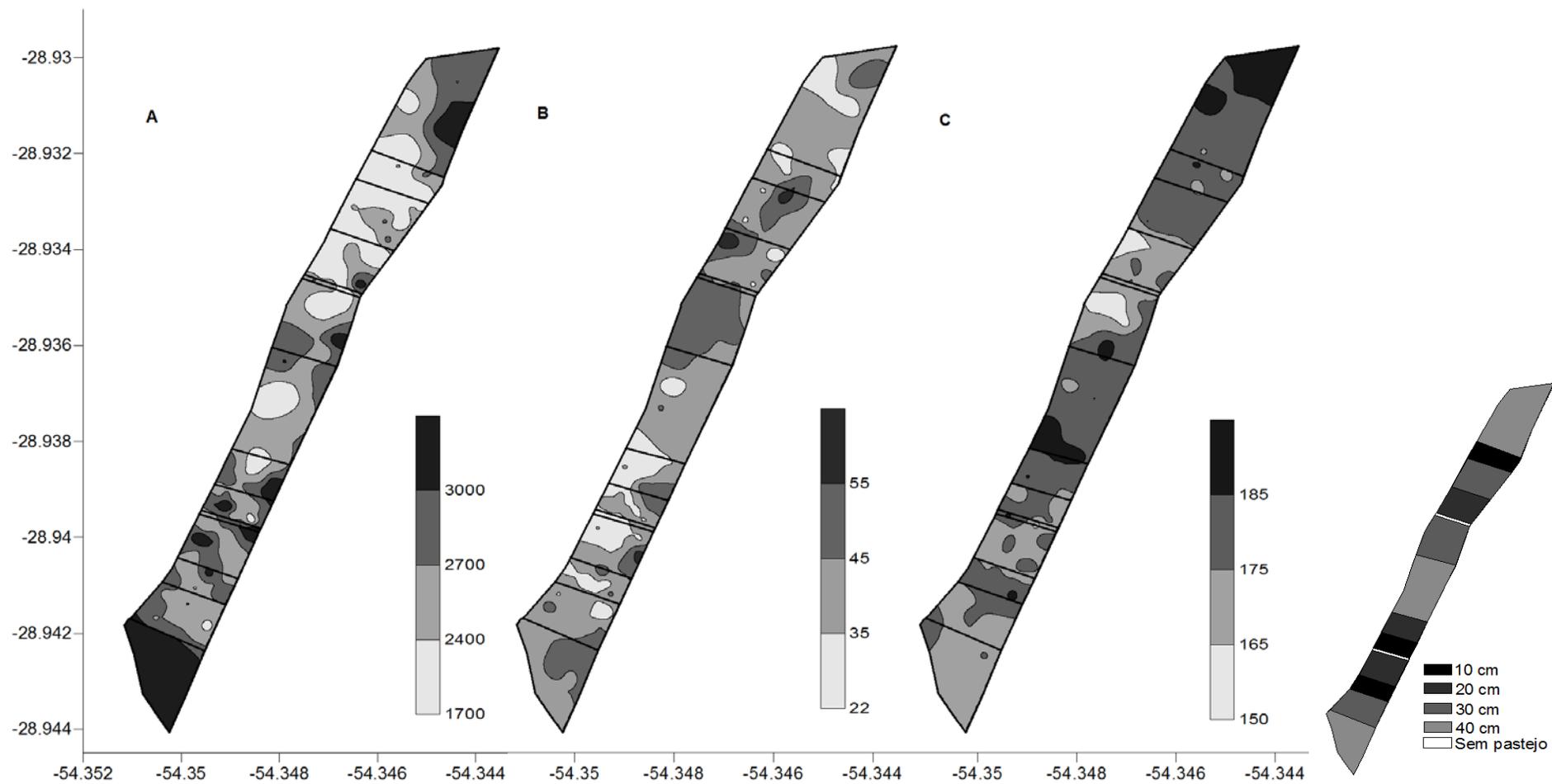


Figura 17. Distribuição Distribuição espacial da produtividade de soja, kg ha^{-1} (A), número de legumes por planta (B) e massa de mil grãos de soja, g (C) safra 2006/07.

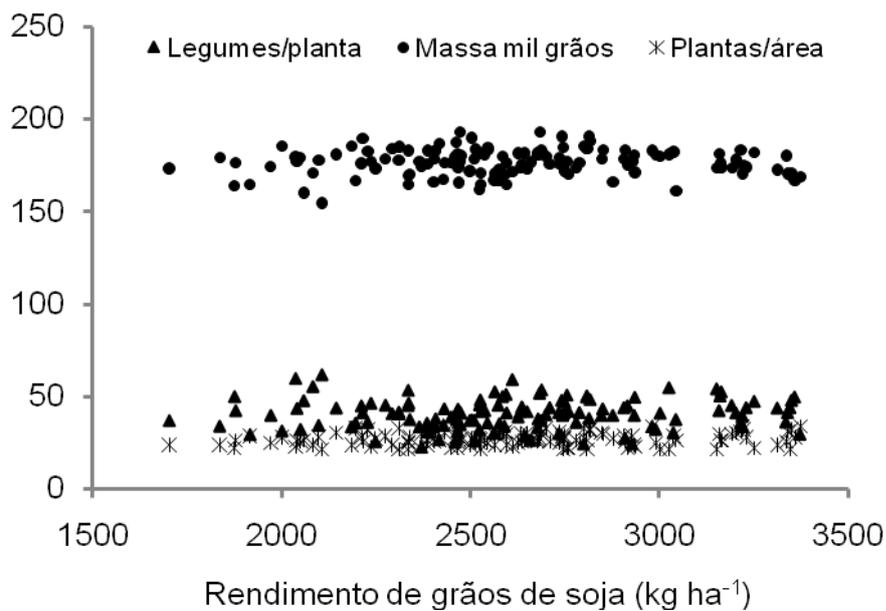


Figura 18. Correlação entre produtividade de soja (kg ha⁻¹) e os componentes de produtividade; número de legumes por planta, massa de mil grãos e plantas por área (m²).

6.4 Conclusões

1. A maioria das variáveis analisadas apresentaram dependência espacial e com isso podem ser empregadas as ferramentas de geoestatística na sua análise, assim como a krigagem para gerar a expressão especializada da variabilidade espacial por meio de mapas de isolinhas.

2. A variabilidade temporal pode ser demonstrada por meio da resistência mecânica do solo à penetração nas duas ocasiões que foi avaliada; no final do período de pastejo e após a colheita da soja.

3. Diante da dependência espacial apresentada por atributos físicos e químicos de solo foi possível correlacionar os mesmos com a produtividade de soja.

4. A presença de animais nas áreas sob pastejo provocou um aumento dos valores da resistência mecânica do solo a penetração após o ciclo de pastejo em relação aos valores observados após o final do ciclo da soja, na camada de 0 a 10 cm.

5. Os tratamentos, alturas da pastagem, proveniente de diferentes intensidades de pastejo não foram o principal fator determinante da variabilidade espacial na maior parte das variáveis analisadas.

7 CONCLUSÕES GERAIS

As condições de superfície de solo proporcionadas pelo sistema integração lavoura-pecuária, especialmente na sequência do período de pastejo, onde os animais condicionam a altura do pasto e conseqüentemente, a quantidade de resíduos remanecentes, e imprimem pressões ao solo, advindas do deslocamento na busca por forragem, não atingiram patamares críticos ao desempenho da cultura da soja. Isto é comprovado pelos valores de densidade e porosidade do solo, assim como pela resistência mecânica do solo à penetração, quando avaliadas comparando-se a condição imediata após pastejos e no final do ciclo da soja, assim como pela evolução desses parâmetros ao longo dos diversos anos de avaliação.

As alterações diagnosticadas nas diferentes variáveis abordadas devido ao efeito da adoção do sistema integrado, com a inserção de animais, no caso os bovinos, são temporárias e reversíveis. Isto foi demonstrado pela oscilação no valor dos atributos físicos do solo, entre as diferentes ocasiões de amostragem e demonstra a capacidade do solo de se reestabelecer de alterações advindas da presença de bovinos em pastejo.

A resistência mecânica do solo à penetração demonstrou ser uma variável prática e eficiente na avaliação de impactos à estrutura do solo, apesar da sua dependência com diversos fatores como textura e conteúdo de água. Esta permite obter grande número de medições quando comparada a métodos tradicionais como a densidade e porosidade do solo, de forma rápida e econômica e com isso se adapta a abordagem espacializada da área, para fins de mapeamento.

A eficiência de mobilização de solo por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras pode ser testada utilizando-se o índice de

mobilização de solo. Por meio deste, foi possível demonstrar a profundidade máxima de trabalho com as mesmas, obtendo-se máxima mobilização por profundidade de sulcamento. O índice de mobilização sofreu pouca influência das condições de superfície do solo, como intensidades de pastejo, tráfego de máquinas e quantidade de resíduos, mais afetado pelo tipo de planta presente no solo.

Ao abordar impactos da adoção de um sistema, como a integração lavoura-pecuária, onde normalmente os experimentos compreendem uma área maior do que as parcelas normalmente empregadas, devido à necessidade de inserir os animais para pastarem, a abordagem em termos de variabilidade espacial pode ser mais adequada do que por meio da análise de variância e comparação de médias. Por se tratar de áreas maiores, é mais provável que ocorra dependência espacial das variáveis, e com isso a abordagem deve englobar o emprego da geoestatística. Além do mais, a inserção de animais ou a própria configuração dos tratamentos podem ser fontes de variabilidade no solo e no sistema como um todo, englobando variáveis de planta, pastagem e animais.

Ao abordar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de solo e de soja, em sistema de integração lavoura-pecuária, com diferentes intensidades de pastejo aplicadas na forma contínua e pressões variáveis, foi constatada pouca influência deste sistema sobre as variáveis investigadas, sendo a variabilidade encontrada, em função de outros fatores.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. REICHERT; J. M., SILVA; V. R.; REINERT; D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da profundidade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo franco arenoso em SPD. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p.275-282, 2003.

ADAMCHUK, V.I.; MOLIN, J.P. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência Mecânica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.161-9, 2006.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeito da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.717-723, 2001.

ALLISON, F.E. **Soil organic matter and its role in crop production**. Amsterdam, Elsevier, p.215-345, 1973.

AMADO, T. J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.; LOVATO, T.; "A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob SPD". **Revista SPD**, Passo Fundo, setembro/outubro de 2005.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Soil Cone Penetrometer** – ASAE S 313.3. Saint Joseph, 2004.

ASAE Standards EP291-3. **Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships**. St. Joseph, MI, p. 116-118, 2005.

BAGGIO, C. CARVALHO, P. C. F.; SILVA, J. L. S.; ANGHINONI, I.; LOPES, M. L. T.; THUROW, J. M. Padrões de deslocamento e captura de forragem por novilhos em pastagem de azevém-anual e aveia-preta manejada sob diferente alturas em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, vol.38, n.2, p.215-222, 2009

BAGGIO, C. CARVALHO, P. C. F.; SILVA, J. L. S.; ROCHA, L. M.; BREMM, C.;

SANTOS, D. T.; MONTEIRO, A. L. G.. Padrões de uso do tempo por novilhos em pastagem consorciada de azevém anual e aveia-preta. **Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa**, vol.37, n.11, p.1912-1918, 2008.

BALASTREIRE, L. A. **Maquinas agrícolas**. São Paulo, Mano Le, 1987. 307 p.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S.D.; MILORI, D.M.P.; BAGNATO, V.S. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v.105, p. 81–92, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e funções da matéria orgânica. In: SANTOS, J. A.; CAMARGO, F. A. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo** – Ecossistemas tropicais & subtropicais. Porto Alegre: Genesis, p. 9-26, 1999.

BERGEIJK, J.V.; GOENSE, D.; SPEELMAN, L. Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. **Journal of Agriculture Engineering Reserch**, Silsoe, v.79, n.4, p.371–387, 2001.

BERTOL O. J., AMADO T. J. C., SCHLOSSER J. F., REINERT D. J. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadura sob condição de preparo reduzido de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p. 257-262, 1997.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. de; ALMEIDA, E. X. de; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p. 1047-1054, 2000.

BERTOL, I.; GOMES, K. E.; DENARDIN, R. B. N.; MACHADO, L. A. Z.; MARASCHI, 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.

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

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849,

2005.

BIRCHAM, J.S. **Herbage growth and utilization under continuous stocking management**. Edinburgh, University of Edinburgh, 1981. (Tese de Doutorado).

BODDEY, R. M., JANTALIA, C. P., CONCEICÃO, P. C., ZANATTA, J. A., BAYER, C., MIELNICZUK, J., DIECKOW, J., SANTOS, H. P., DENARDIN, J. E., AITA, C., GIACOMINI, S. J., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Illinois, v. 16, p.784–795, 2010.

BORDIGNON, J. **Projeto, construção e desenvolvimento de transdutores para medição de esforços em semeadoras-adubadoras**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BORTOLOTTI, V. C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTI, M. C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e coberturas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n. 1, p. 122-130, 2006.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; RESSIA, M.; FERRERO, C.; ROSATTO, H.; TOURN, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n.1-2, p.164-172, 2006.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 9-14, 2006.

BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob SPD**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BROCH, D. L.; PITOL, C.; BORGES, E. P. **Integração agricultura-pecuária: SPD de soja na integração agropecuária**. Maracajú-MS: Fundação MS, 1997. 24 p. (Informativo Técnico)

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R. & SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMARGO, L. A.; JÚNIOR J. M. PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hill slope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p. 617-630, 2010.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: O. A. Cameron, 1997. 133 p.

CAMBARDELLA, C.A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURV, R.F. & KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.47, p.1501-1511, 1994.

CAMPBELL, R.B.; KARLEN, D.L.; SOJKA, R.E. Conservation tillage for maize production in the U.S. southeastern coastal plain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 4, p. 511-529, 1984.

CAMPOS, M.C.C.; FERRAZ, F.B.; SOUZA FREITAS, E.V.; Souza, Z. M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodosolo da zona da mata de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências Da Terra**, Campina Grande, v. 7, p.83-91, 2007.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n. 3-4, p. 167-178, 2001.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.27, p.695-703, 2003.

CARVALHO, P. C. DE F.; ANGHINONI, I.; MORAES, A. ; SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R. ; FLORES, J. P. C.; LOPES, M. L. T.; SILVA, J. L. S.; CONTE, O. ; LIMA WESP, C.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Bonn, p. 1-15, 2010.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAUJO, A. G.; RALISCH, S.; SILVA, A. L.; LADEIRA, A. S.; SILVA, J. C.; MACHADO, P.; ROSSETO, R. **Avaliação do desempenho da semeadora- adubadora Magnum 2850PD no basalto paranaense.** Londrina:IAPAR, 1998. p. 1-47. (Circular IAPAR, 105).

CASSOL, L. C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície.** 2003. 143 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CEPIK, C. T. C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante.** 104 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em função do conteúdo de água, profundidade e velocidade de operação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.447-57, 2005.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.2-3, p.113-125, 1996.

CHANCELLOR, W. J. **Soil physical properties.** In: CHANCELLOR, W. J. (coord.). *Advances in soil dynamics.* Saint Joseph : ASAE, 1994. p. 21-254.
COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CONTE, O. **Atributos físicos de solo e demanda de tração em semeadura direta de soja, com diferentes pressões de pastejo em sistema de integração lavoura-pecuária.** 2007. 91p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CONTE, O. LEVIEN, R., TREIN, C. R., XAVIER, A. A. P., DEBIASI, H. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em SPD. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44 n.10, p.1254-1261, 2009.

CONTE, O. LEVIEN, R.; TREIN C. R.; MAZURANA, M.; DEBIASI H. Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p.730-739, 2008.

CONTE, O. LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CEPIK, C. T. C.; DEBIASI, H.. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 220-228, 2007.

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**, Brasília, v.30, n.1, p.107-114, 1995.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C; VIEIRA, F. C. B.; MARTINS, A.P.; FERREIRA, E. V. O. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.109, p. 41–49, 2010.

COUTO, E.G. & KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do estado de mato grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.34, n.12, p.2321-2329, 1999.

DEBIASI, H. LEVIEN, R.; TREIN C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, vol.32, p.2629-2637, 2008.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um Argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, RS.

DENARDIN, J. E. **Manejo adequado do solo para áreas motomecanizadas**. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DO SOLO E SPD NO BRASIL, 9., 1983, Passo Fundo. Anais. Passo Fundo: 1984. p.107-123.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 253-263, 1986.

DESBIOLLES, J. M. A.; GODWIN, R. J.; KILGOUR, J.; BLACKMORE, B. S. Prediction of tillage implement draught using cone penetrometer data. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe v.73, p.6576.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN- NETO, L.; MILORI, D.M.B.P.; SALTON, J.C.; MACEDO, M.C.M.; MIELNICZUK, J.; HERNANI, L.C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.60, p.240-249, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro:CNPS, 1997. 212p.

FAGANELLO, A. **Avaliação de sulcadores para semeadura direta**. 1989, 77f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, 1989.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A. SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A. & BORSSOI, J. A. seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.32, p.463-476, 2008.

FERRERO, A.; USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 127–138, 2005.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A. C. A.; JÚNIOR, R. S. O. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p. 1773-1779, 2006.

FILLHO, O. G.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. R.; NAGUMO, C. H.; DECHEM, S. C. F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.1-14, 2010.

FLORES, J. P. C. **Atributos físicos e químicos do solo e rendimento de soja sob integração lavoura-pecuária em sistemas de manejo**. 102 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2008.

FLORES, J. P. C., ANGHINONI, I., CASSOL, L. C., CARVALHO, P. C. F., LEITE, J. G. D., FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em SPD em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, V 31, p.771-780, 2007.

FOHLKE, T.; INGERSOLL, T.; ROE, R.D. **Soil disturbance in no-till and direct seed planting systems**. Natural Resources Conservation Service, Agronomy, Technical Note n. 39, p.1-6, 2000.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.8, p. 947-953, 2003.

GASSEN, F.; "Monitoramento da compactação do solo: uma proposta da assistência técnica". **Revista SPD**, Passo Fundo, Edição 92, março/abril de 2006.

GIRMA, K.; MARTIN, K. L.; ANDERSON, R.H.; ARNALL, D. B.; BRIXEY, K. D.; CASILLAS, M. A.; CHUNG, B.; DOBEY, B. C.; KAMENIDOU, S. K.; KARIUKI, S. K.; KATSALIROU, E.E.; MORRIS, J.C.; MOSS, J.Q.; ROHLA, C.T.; SUDBURY, B.J.; TUBANA, B.S.; RAUN, W.R. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.29, n.5, p.873-897, 2006.

GLANCEY, J.L.; UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J.; RUMSEY, J.W. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.1, p.47-65, 1996.

GODWIN, R.J. & O`DOGHERTY, M.J. Integrated soil tillage force prediction models. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v.44, p.3-14, 2007.

GODWIN, R.J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. **Soil and Tillage Research**, v.97, p.331-340, 2007.

GOLDEN SOFTWARE – SURFER for windows. Release 9.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**. User's guide. New York, Golden Software, 1999. 619p.

GOMES, N.M.; SILVA, A. M., MELLO, C. R., FARIA, M. A. & OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.31, p.435-443, 2007.

GREENWOD, K. L., McKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and consequences for pasture: a review, **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Queensland v. 41, p.1231-1250, 2001.

GREGO, C. R. & VIEIRA, S R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005.

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**, Amsterdam, v.11, n. 3-4, p. 239-282, 1988.

HANQUET, H.; SIRJACOBS, D.; DESTAIN, M.F.; FRNKINET, M.; VERBRUGGE, J. C. Analysis of soil variability measured with a soil strength sensor. **Precision Agriculture**, v.5 n.3, p.227–246, 2004.

HAYHOE, H.N.; LAPEN, D.R.; McLAUGHLIN, N.B. Measurements of mouldboard plow draft. I. Spectrum analysis and filtering. **Precision Agriculture, Ohio**, v.3, p.225–236, 2002.

HEMMAT, A. & ADAMACHUK, V.I. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. **Computers and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v.63, p.89-103, 2008.

HERZOG, R. L. S. **Resposta da soja em semeadura direta após aveia preta implantada em campo nativo, influenciada por quantidade de resíduo, irrigação e profundidade de atuação do sulcador da semeadora-adubadora**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-

Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982, 364p.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego; Academic Press, 2004, 494p.

HORN, R.; LEBERT, M. **Soil compactability and compressibility**. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van. (Ed.) **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier, p. 45-69, 1994.

HUGGINS, D.R. & REGANOLD, J.P. **No-till: The quiet revolution**. Scientific American, INC, 77, p.1-8, 2008.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.7, p. 1493-1500, 2000.

JANIK, G. Spatial variability of soil moisture as information on variability of selected physical properties of soil. **International Agrophysics**, Lublin, v. 22, p.35-43, 2008.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G. ROCHA, J. V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.212-219, 2004.

JORAJURÍA COLLAZO, D. **Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular**. Una Revisión. In: JORAJURÍA COLLAZO, D. (Org.) **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: Modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 39-55.

JORAJURÍA COLLAZO, D. **Compactación del suelo agrícola inducida por**

tráfico vehicular. Una Revision. In: JORAJURÍA COLLAZO, D. (Org.) Reologia del suelo agrícola bajo tráfico: 2005.

JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 66, n.4, p 261–265, 1997.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**.5 ed. London: Academic Press, 1991. 561p.

JUNIOR, J. C. O.; SOUZA, L. C. P.; MELO, V. F.; Variabilidade de atributos químicos e físicos de solos da formação Guabirovatuba em diferentes unidades de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34. p.1491-1502, 2010.

JÚNIOR, L. A. Z.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. G.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolo sob SPD. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.389-400, 2010.

KAMIMURA, K. M., LEVIEN, R., TREIN, C. R., CONTE O. Parâmetros de solo-máquina em função de doses de resíduos vegetais e diferentes profundidades de deposição de adubo em semeadura direta. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, p.431-439, 2009.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. v.1, p. 499-510.

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

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e conteúdo de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

LAL, R. Constraints to Adopting No-Till Farming in Developing Countries. **Soil Tillage Reserch**, Amsterdam, v.94, n.1, p.1–3, 2007.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo:

Fundação Editora da UNESP, 1998. 226 p. (Ciência e Tecnologia).

LANZANOVA, M. E.; LOVATO, T.; NICOLOSO, R. S. **Frequência de pastoreio na pastagem de inverno e sua influência na produtividade de grãos de soja, sob SPD.** In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, 2004. 1 CD-ROM.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem.** 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LIMA, J. S. S.; SATTLER, M. A.; PASSOS, R. R.; OLIVEIRA, P. C.; SOUZA, G. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo vermelho-amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.185-195, 2009.

LOPES, M. L. T., CARVALHO, P. C. F. ANGHINONI, I., D. T., AGUINAGA, A. A. Q., FLORES, J. P. C., MORAES, A. Sistema de integração lavoura-pecuária: efeito do manejo da altura em pastagem de aveia preta e azevém anual sobre a produtividade da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.5, p. 1499-1506, 2009.

LUNARDI, R.; CARVALHO, P. C. de F.; TREIN, C. R.; COSTA, J. A.; CAUDURO, G. F.; BARBOSA, C. M. P.; AGUINAGA, A. A. Q. Rendimento de soja em sistema de integração lavoura pecuária: efeito de métodos e intensidades de pastejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.795 801, 2008.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.38, p.133-146, 2009.

MACHADO, L. O.; LANA, Â M. Q.; LANA, R. M. Q, GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 31, p.591-599, 2007.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O. ; MEIRELES, M. S. P.; SILVA, C. A. ; GIMENEZ, L. ; MOLIN, J. P.; MADARI, B. E. Carbon stocks of a Rhodic Ferralsol under no-tillage in Southern Brazil: spatial variability at a farm scale. **Australian Journal of Soil Research**, Crawley, v.47, p. 253-260, 2009.

MARCHÃO, R. L. **Integração Lavoura pecuária num Latossolo do Cerrado: Impactos na física, matéria orgânica e macrofauna.** 154 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, BR-GO, 2007.

McLAUGHLIN, N. B.; MACLEOD, J. B.; SANDERSON, J. B.; IVANY, J. A. Effect of red clover (*Trifolium pratense* L.) kill with glyphosate on tillage implement draft. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 63-70, 2004.

MELLO, L. M. M. **Integração agricultura-pecuária em SPD: atributos físicos e cobertura residual do solo, produção de forragem e desempenho econômico.** 2001. 72 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C. M.; YANO, E. H. **Condicionamento físico do solo na linha de semeadura de milho em SPD: mecanismos sulcadores e rodas compactadoras.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. Anais... Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1149-1159, 2003.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R. & GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.11, p.1513-1519, 2009.

MNZTFA. **Zero Tillage.** Brandon: Zero Tillage Farmers Association, Leech Printing, 1998. 118 p.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. parte I: o que e estado da arte em sensoriamento, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.2, p.97-107,1997.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: O gerenciamento da variabilidade.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83p. Cap. 5: Tratamentos localizados.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de

produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.

MOLIN, J. P., MAGALHÃES, R. P., FAULIN, G. D. C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em áreas sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p.442-452, 2006.

MOLIN, J. P.; SILVA JÚNIOR, R. L. Variabilidade espacial do índice de cone, correlacionada com textura e produtividade. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 14, p. 49-57, 2003.

MOLIN, J. P.; VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. D. C.; MASCARIN, L. S. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Brasília, v.6, p.309-324, 2007.

MORAES, A.; PELISSARI, A.; ALVES, S. J.; CARVALHO, P. C. F.; CASSOL, L. C. Lavoura-pecuária em sistemas integrados na pequena propriedade. In: Encontro Latino Americano Sobre SPD na Pequena Propriedade, 3., 1998, Pato Branco. Anais... Pato Branco: CEFET-PR, 1998. CD-ROM.

MOTAMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T.; Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.485-496, 2006.

NEMÉNYI, M.; MESTERHÁZI, P. Á; MILICS, G. An application of tillage force mapping as a cropping management tool. **Biosystems Engineering**, Silsoe, v.94, n.3, p.351–357, 2006.

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de conteúdo de água. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, 1992.

O'CALLAGHAN, J.R. & McCULLEN, P.J. Cleavage of soil by inclined and wedge-shaped tines. **Journal of Agricultural Engineering Reserch**; Silsoe, v.10, n.3, p.248–54, 1965.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E. & LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.783-789, 1999.

O'SULLIVAN, M.F.; HENSHALL, J.K.; DICKSON, J.W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325-335, 1999.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Campinas, v. 15, p. 135-140, 1991.

PARFITT, J.M.B.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; CASTILHOS, D. D.; ÁVILA, C.L. & RECKZIEGEL, N.L. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated Rice. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.819-830, 2009.

PORTELLA, J. A. **Um estudo preliminar das forças atuantes em elementos rompedores de semeadoras diretas comerciais**. Dissertação (Mestrado) Campinas, UNICAMP, 69p, 1983.

PRECHAC, F.G. Propriedades físicas y erosion in rotaciones de cultivos y pasturas. *Revista Inia Inv.*, n.1, p.127-140, 1992.

RADFORD, B. J.; BRIDGEB, B. J.; DAVISC, R. J.; McGARRYD, D.; PILLAIE, U. P.; RICKMANF, J. F.; WALSHG, P. A.; YULEH, D. F. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3-4, p. 155-170, 2000.

RAGHAVAN, G. S.V.; MCKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 22, n. 1, p. 79-83, 1977.

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, FERREIRA, F. G. Estimativa do potencial de rendimento por estrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol.34, n.1, p.33-40, 2004.

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Produtividade da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.3, p.405-411, 2003.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, 2005.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Manole, 1990. 186 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REIS, E. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; ARAÚJO, E. F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 777-785, 2006.

ROBERTSON, G.P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. da S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 109-115, 2002.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 29).

SALTON, J.C.; OLIVEIRA, H.; FABRÍCIO, A.C.; MACHADO, L.A.Z. Uso do SGI/INPE na avaliação de atributos físicos do solo no sistema de integração agricultura-pecuária. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n.51, 1999.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecânica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. RAMÍREZ, J.J.; LITAGO, J.J.; HERNANZ, J. L. Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 25-37, 2005.

SANTI A. L.; DELLA FLORA, L. P.; BUAES A. G.; ALBUQUERQUE, M.; MARTINS F. R. A. & MACHADO, F. C. Monitoramento da compactação do solo através do mapeamento de resistência à penetração. **Revista Plantio Direto**, edição 96, novembro/dezembro de 2006. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, RS.

SANTOS, H. L. & VASCONCELLOS, C.A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 11:97-100, 1987.

SANTOS, P. A.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAG, E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear e espacial entre o produtividade do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.287-295, 2005.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade da 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, 2004.

SILVA, A. P., KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n.6, p. 1775-1781, 1994.
SILVA, A. P.; INHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.70, n.1, p.83-90, 2003.

SILVA, DA J.T.M.; ALEXANDRE, C. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics, **Precision Agriculture**, New York, v.6, p.453-466, 2005.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, J. R. M.; PEÇA, J. O.; SERRANO, J. M.; CARVALHO, M. J.; PALMA, P. M. Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. **Precision Agriculture**, Silsoe, v.9, p.209–229, 2008.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial e fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, P. R. A. **Mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora na cultura do milho (*Zea mays* L.) no sistema de SPD**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, R. H. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37. n. 6, p. 855-860, 2002.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R. REICHERT; J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em SPD. **Ciência Rural**, Santa Maria, V. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SIMÕES, W. L.; SILVA, É. L.; LIMA, D. M.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.30, p.1061-1068, 2006.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.751-759, 2009.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.203-211, 2008.

SMECK, N. E.; RUNGE, E. C. A.; MACKINGTOSH, E. E. 1993. **Dynamics and genetic modeling of soil systems**. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F., Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Amsterdam, Elsevier Science. Cap. 3, p. 51–81.

SOUSA, A.R.; SILVA, A.B.; RESENDE, M. **Influência da pressão exercida por pisoteio de animais na compactação do solo do vale do Pajeú, em Pernambuco**. In: REUNIÃO BRASILEIRO DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12., 1988, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SBCS, 1998. p. 256-257.

SOUZA, C. R.; JÚNIOR, J. M.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1067-1074, 2003.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P.; CAO, E.; ANDRIGHETTI, M. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3. 2010.

SOUZA, G. S. de; LIMA, J. S. de S.; SILVA, S. de A.; OLIVEIRA, R. B. de. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.30, p.589-596, 2008.

SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 1992. 149 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.51-58, 2004.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S., TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob SPD. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 37-44, 2010.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S., TOMM, G. O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob SPD. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.129-136, 2009.

SPERA, S. T. SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S., TOMM, G. O. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob SPD. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.9, n.1, p.23-31, 2004.

TABOADA, M. A. **Efectos del pastoreo y pisoteo animal sobre las propiedades físicas de suelos**. In: JORAJURÍA COLLAZO, D. (Org.) Reología del suelo agrícola bajo tráfico: Modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p.131-143.

TANNER, C. B.; & MAMARIL, C. P. Pasture soil compaction by animal traffic. **Agronomy Journal**, Madison, v.51, n.6, p.329-331, 1959.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n. 2-3, p.111-119, 1991.

TIMM L. C.; DOURADO-NETO D.; BACCHI O. O.; HU W.; BORTOLOTTO R. P.; SILVA A. L.; BRUNO I. P.; REICHARDT K. Temporal variability of soil water storage evaluated for a coffee field. **Soil Research**, Crawley, v.49, 77–86, 2011.

TOLEDO, A.; FURLANI, C. E. A.; DA SILVA, R. P.; LOPES, A., DABDOUB, M. J. Comportamento espacial da demanda energética em semeadura de amendoim em Latossolo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.459-467, 2010.

TORMENA, C. A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**. 1998. 106 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob SPD influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

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**, Campinas, v.15, n.1, p.105-111, 1991.

TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a

maize–soil system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, n.2, p.151-161, 2003.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

UTSET, A. & CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, p.193-202, 2001.

VEEN, B. W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 219-226, 1990.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.

VICENTE, J. **Estudo comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão**. Presidente Prudente – SP: Unesp, 2004. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

VIEIRA JUNIOR, P. A.; MOLIN, J. P.; DOURADO NETO, D.; MANFRON, P. A.; MASCARIN, L. S.; FAULIN, G. D. C.; DETOMINI, E. R. População de plantas e alguns atributos do solo relacionados a produtividade de milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, p.483-492, 2006.

VIEIRA, M. L. & KLEIN, V. A. 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.

VIEIRA, S. R.; FILHO, O. G.; CHIBA, M. K.; CANTARELLA, H. Spatial variability of soil chemical properties after coffee tree removal. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 33, p.1507-1514, 2009.

VIEIRA, S. R.; FILHO, O. G.; CHIBA, M. K.; MELLIS, E. V.; DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C. Variabilidade dos teores foliares de nutrientes e da produção da soja em dois anos de cultivo em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1503-1514, 2010.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.V.H.; SCHAEFER, G.R. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C. & REYNOLDS, W.D. **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data**. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.1-45. 2002.

WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL. D. **Applications of soil physics**. New York, Academic, 1980, Cap. 2, p. 319-344.

WATKIN, B. R.; CLEMENTS, R. J. **The effects of grazing animals on pastures**. In: WILSON, J.R. (Ed.) Plant relations in pastures. East Melbourne : CSIRO, 1978. p. 273–289.

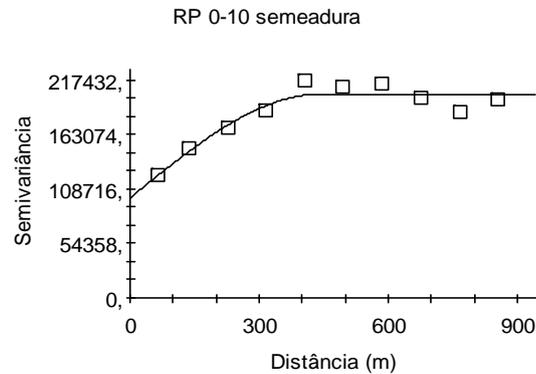
WHEELER, P. N. & GODWIN, R. J. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v.63, p.243 – 250, 1996.

XAVIER, A. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta**. 2005. 99f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2005.

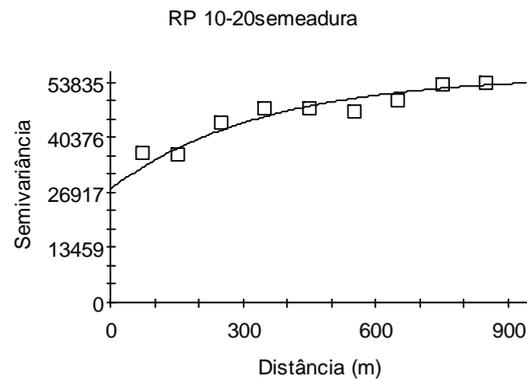
ZIMBACK, C. R. L. **Análise especial de atributos químicos de solo para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001, 114f Tese (livre Decência), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

9 RELAÇÃO DE APÊNDICES

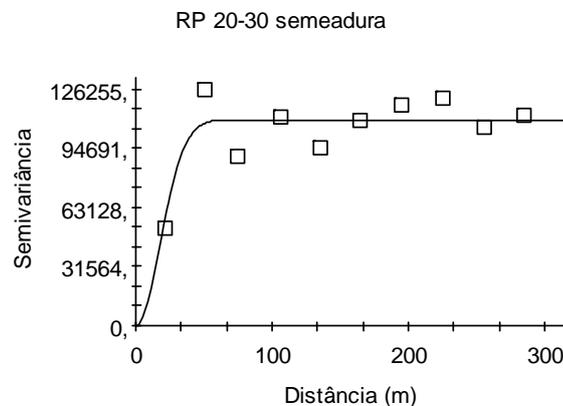
Apêndice 1. Semivariogramas para resistência do solo à penetração mecânica, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, avaliada na semeadura da soja.



Spherical model ($C_0 = 99900,000$; $C_0 + C = 203600,000$; $A_0 = 441$; $r^2 = 0,907$;
RSS = $7,74E+08$)

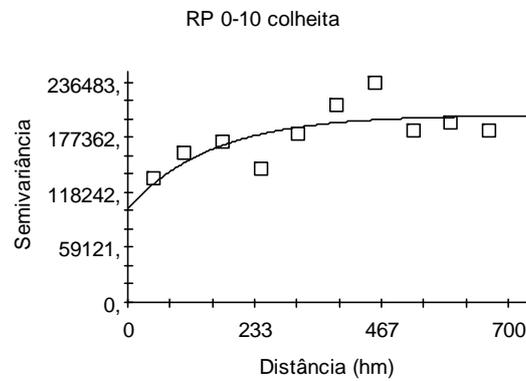


Exponential model ($C_0 = 27790,000$; $C_0 + C = 55590,000$; $A_0 = 344$; $r^2 = 0,902$;
RSS = $3,95E+07$)

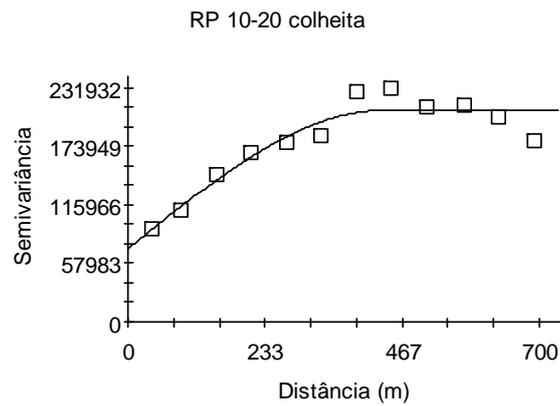


Gaussian model ($C_0 = 100,000$; $C_0 + C = 110100,000$; $A_0 = 25$; $r^2 = 0,715$;
RSS = $1,18E+09$)

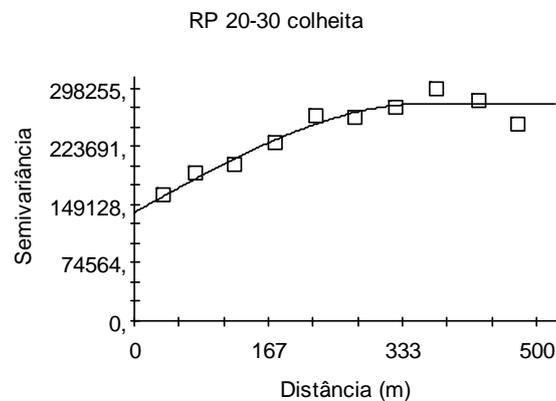
Apêndice 2. Semivariogramas para resistência do solo à penetração mecânica, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm, avaliada na colheita da soja.



Exponential model ($C_0 = 100700,000$; $C_0 + C = 201500,000$; $A_0 = 153$; $r^2 = 0,524$; $RSS = 4,01E+09$)

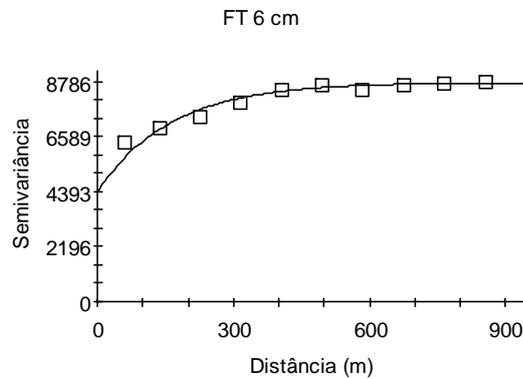


Spherical model ($C_0 = 72300,000$; $C_0 + C = 210100,000$; $A_0 = 438$; $r^2 = 0,898$; $RSS = 2,21E+09$)

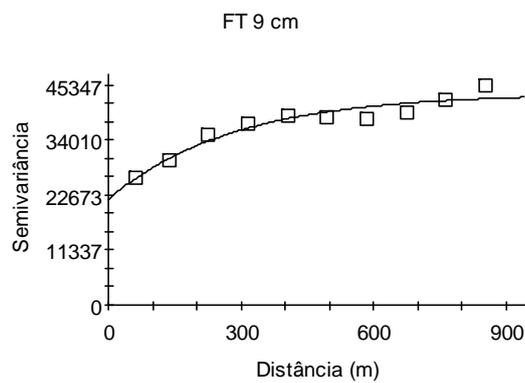


Spherical model ($C_0 = 139300,000$; $C_0 + C = 278700,000$; $A_0 = 361$; $r^2 = 0,927$; $RSS = 1,32E+09$)

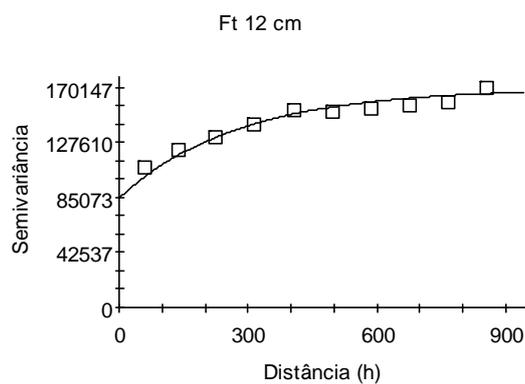
Apêndice 3. Semivariogramas para força de tração em haste sulcadora, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), nas profundidades 6, 9 e 12 cm, avaliada na semeadura da soja safra 2007/08.



Exponential model ($C_0 = 4380,000$; $C_0 + C = 8761,000$; $A_0 = 161$; $r^2 = 0,955$; $RSS = 497987,$)

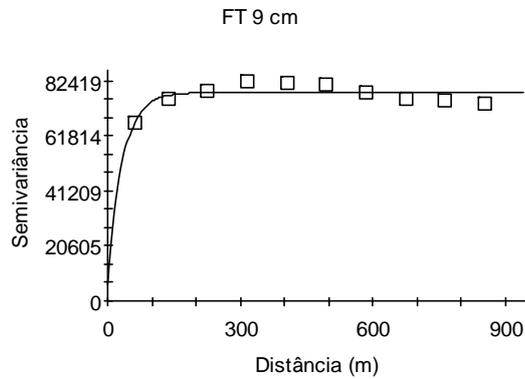


Exponential model ($C_0 = 21820,000$; $C_0 + C = 43650,000$; $A_0 = 282$; $r^2 = 0,926$; $RSS = 2,15E+07$)

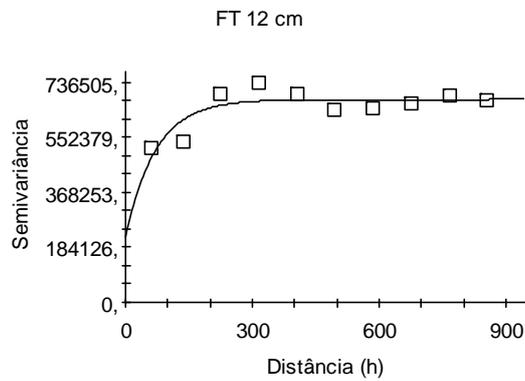


Exponential model ($C_0 = 84700,000$; $C_0 + C = 169500,000$; $A_0 = 278$; $r^2 = 0,969$; $RSS = 1,83E+08$)

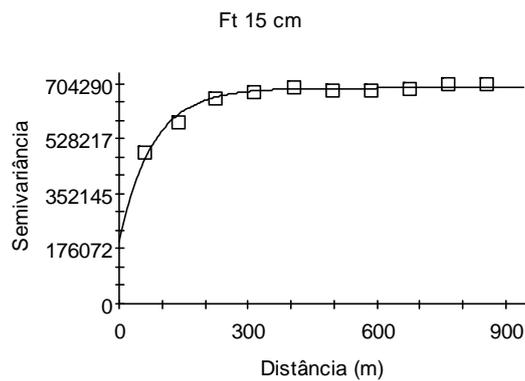
Apêndice 4. Semivariogramas para força de tração em haste sulcadora, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), nas profundidades 9, 12 e 15 cm, avaliada na semeadura da soja safra 2008/09.



Exponential model ($C_0 = 6200,000$; $C_0 + C = 78180,000$; $A_0 = 33$; $r^2 = 0,595$;
RSS = $7,64E+07$)

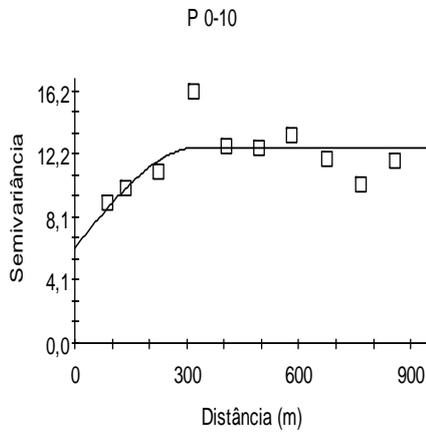


Exponential model ($C_0 = 219000,000$; $C_0 + C = 680000,000$; $A_0 = 71$; $r^2 = 0,678$;
RSS = $1,45E+10$)

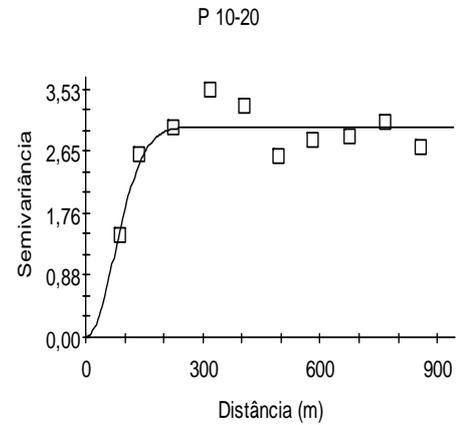


Exponential model ($C_0 = 200000,000$; $C_0 + C = 691300,000$; $A_0 = 79$; $r^2 = 0,970$;
RSS = $1,44E+09$)

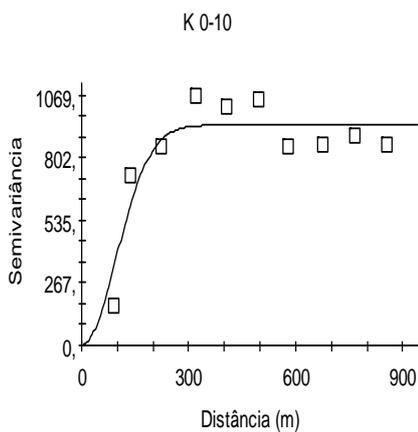
Apêndice 5. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, fósforo e potássio, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.



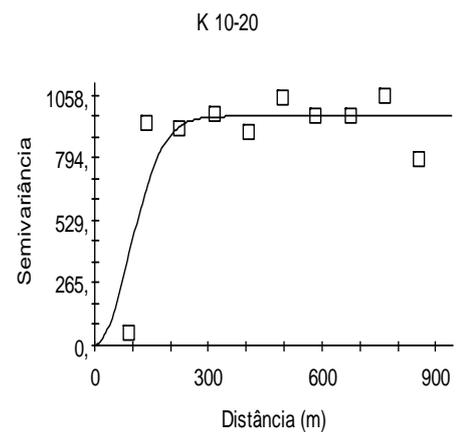
Spherical model ($C_0 = 6,1500$; $C_0 + C = 12,5800$; $A_0 = 326$; $r^2 = 0,428$; $RSS = 21,3$)



Gaussian model ($C_0 = 0,0010$; $C_0 + C = 2,9920$; $A_0 = 104$; $r^2 = 0,747$; $RSS = 0,719$)

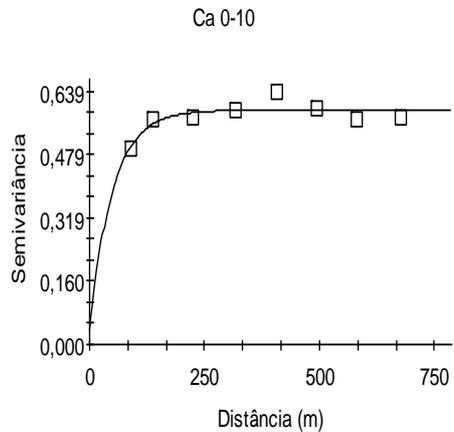


Gaussian model ($C_0 = 1,0000$; $C_0 + C = 943,0000$; $A_0 = 136$; $r^2 = 0,839$; $RSS = 102294,$)

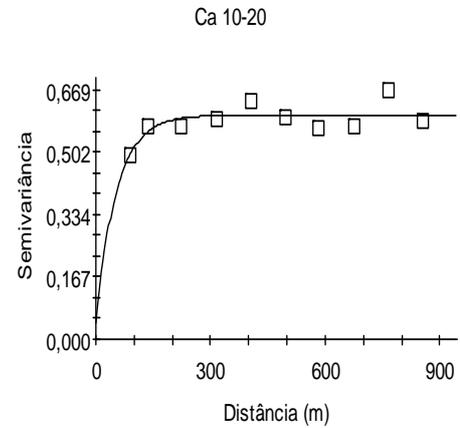


Gaussian model ($C_0 = 1,000$; $C_0 + C = 970,000$; $A_0 = 127$; $r^2 = 0,745$; $RSS = 226587,$)

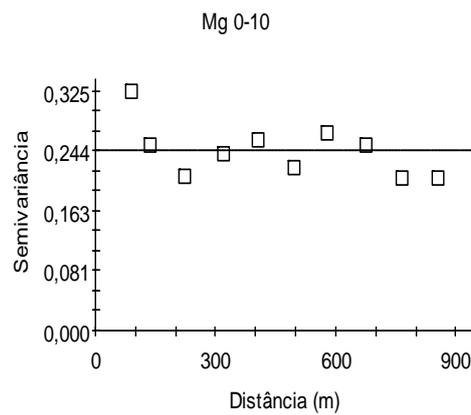
Apêndice 6. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, cálcio e magnésio, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.



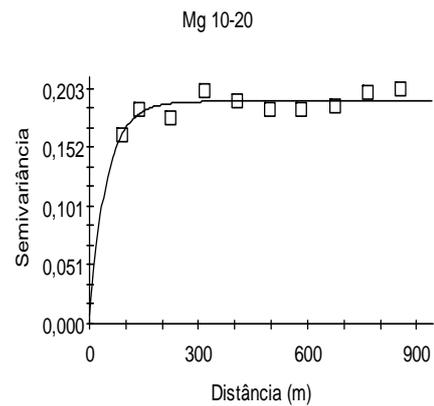
Exponential model ($C_0 = 0,0380$; $C_0 + C = 0,5920$; $A_0 = 50$; $r^2 = 0,69$
RSS = $3,595E-03$)



Exponential model ($C_0 = 0,0460$; $C_0 + C = 0,6020$; $A_0 = 54$; $r^2 = 0,54$
RSS = $8,888E-03$)

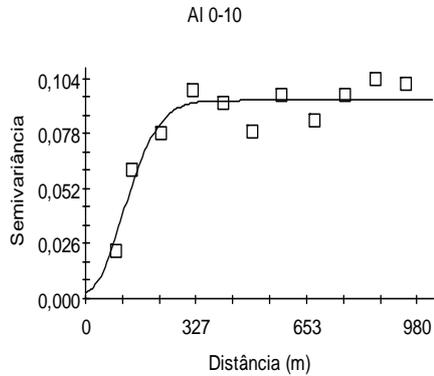


Linear model ($C_0 = 0,2443$; $C_0 + C = 0,2443$; $A_0 = 856$; $r^2 = 0,285$
RSS = $0,0119$)

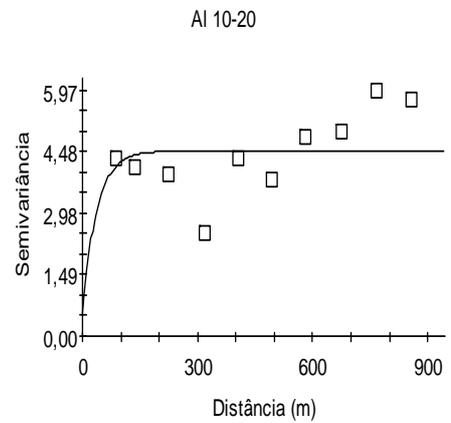


Exponential model ($C_0 = 0,0075$; $C_0 + C = 0,1920$; $A_0 = 48$; $r^2 = 0,591$
RSS = $5,443E-04$)

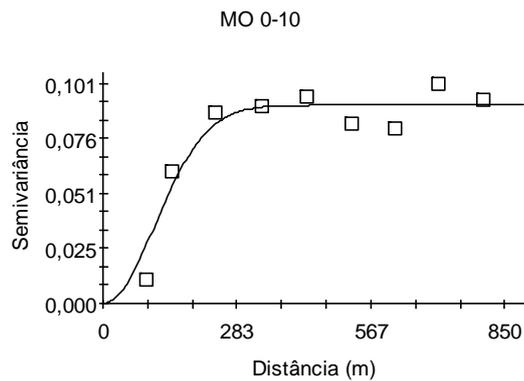
Apêndice 7. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, alumínio e matéria orgânica do solo, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.



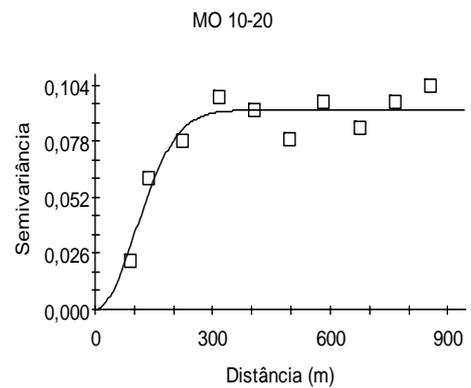
Gaussian model ($C_0 = 0,0032$; $C_0 + C = 0,0934$; $A_0 = 152$; $r^2 = 0,887$; $RSS = 6,401E-04$)



Exponential model ($C_0 = 0,5500$; $C_0 + C = 4,4970$; $A_0 = 37$; $r^2 = 0,007$; $RSS = 8,98$)

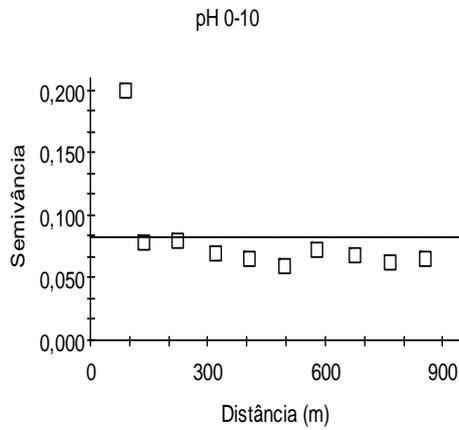


Gaussian model ($C_0 = 0,0001$; $C_0 + C = 0,0912$; $A_0 = 155$; $r^2 = 0,887$; $RSS = 6,430E-04$)

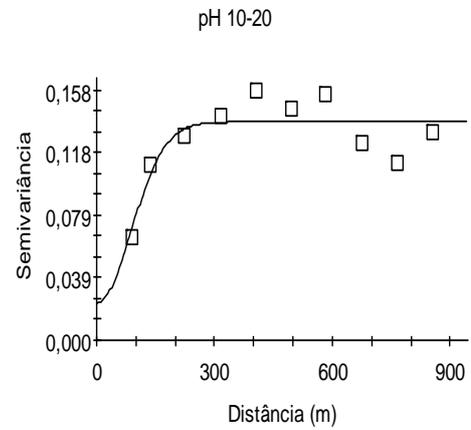


Gaussian model ($C_0 = 0,0001$; $C_0 + C = 0,0922$; $A_0 = 146$; $r^2 = 0,893$; $RSS = 5,660E-04$)

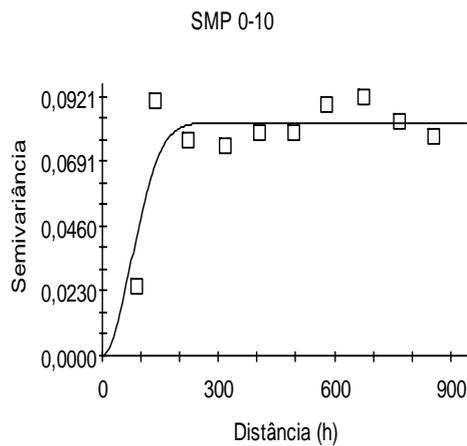
Apêndice 8. Semivariogramas para os atributos químicos de solo, pH e SMP, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.



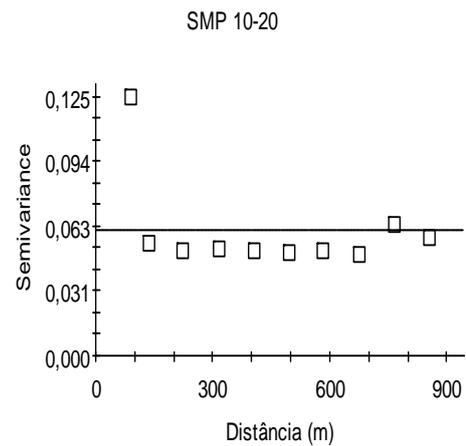
Linear model ($C_0 = 0,0818$; $C_0 + C = 0,0818$; $A_0 = 856$; $r^2 = 0,322$; $RSS = 0,0159$)



Gaussian model ($C_0 = 0,0234$; $C_0 + C = 0,1378$; $A_0 = 123$; $r^2 = 0,7$; $RSS = 1,753E-03$)

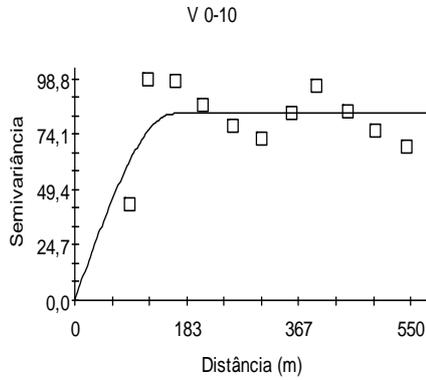


Gaussian model ($C_0 = 0,0001$; $C_0 + C = 0,0829$; $A_0 = 104$; $r^2 = 0,7$; $RSS = 1,087E-03$)

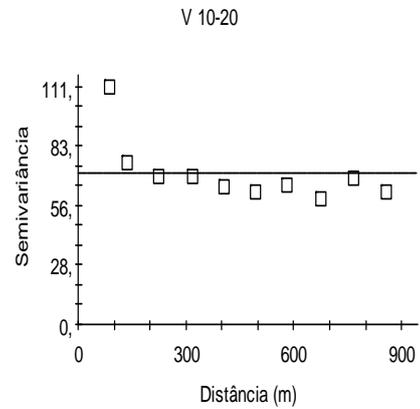


Linear model ($C_0 = 0,0603$; $C_0 + C = 0,0603$; $A_0 = 856$; $r^2 = 0,166$; $RSS = 4,820E-03$)

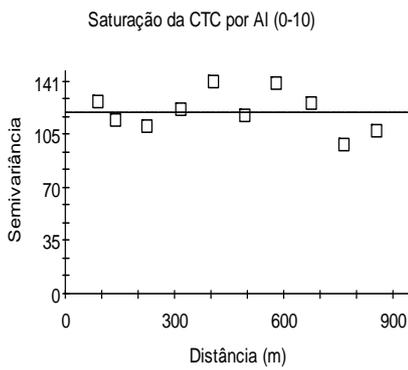
Apêndice 9. Semivariogramas para saturação da CTC do solo, por bases trocáveis e por Al^{3+} nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (Co) patamar ($Co + C$) e alcance (Ao), avaliados após o período de pastejo, em novembro de 2008.



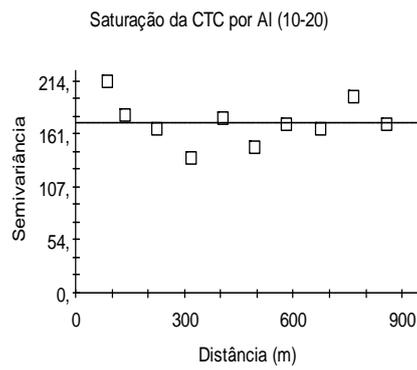
Spherical model ($Co = 0,1000$; $Co + C = 83,3600$; $Ao = 162$; $r2 = 0,38$
RSS = 1748,)



Linear model ($Co = 70,624$; $Co + C = 70,624$; $Ao = 856$; $r2 = 0,422$;
RSS = 2043,)

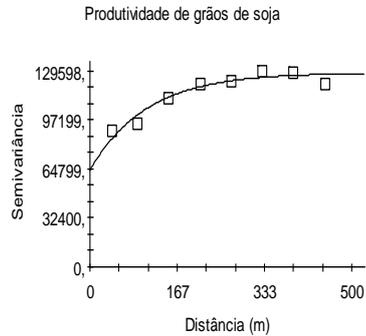


Linear model ($Co = 120,5498$; $Co + C = 120,5498$; $Ao = 856$; $r2 = 0,063$;
RSS = 1628,)

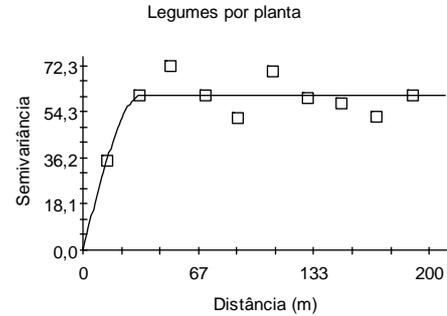


Linear model ($Co = 172,6670$; $Co + C = 172,6670$; $Ao = 856$; $r2 = 0,000$;
RSS = 4495,)

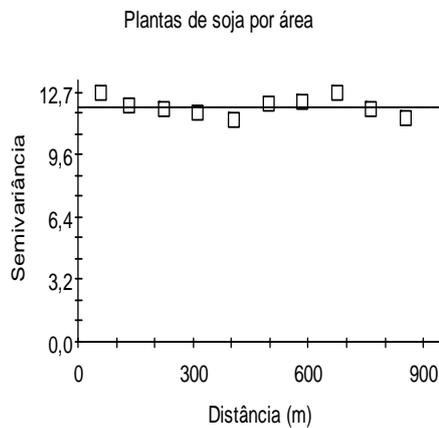
Apêndice 10. Semivariogramas para atributos de soja: produtividade kg ha^{-1} , número de legumes por planta, plantas por m^2 , e massa de 1000 grãos, com os respectivos modelos de ajuste e os parâmetros efeito pepita (C_0) patamar ($C_0 + C$) e alcance (A_0), avaliada na safra 2007/08.



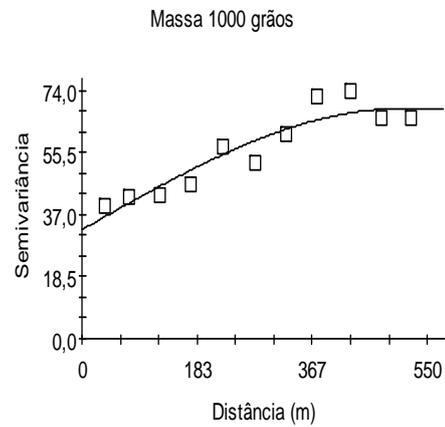
Exponential model ($C_0 = 64200,000$; $C_0 + C = 128500,000$; $A_0 = 108$; $r^2 = 0,927$; $RSS = 1,20E+08$)



Spherical model ($C_0 = 0,200$; $C_0 + C = 60,770$; $A_0 = 34$; $r^2 = 0,609$; $RSS = 388,$)



Linear model ($C_0 = 12,0326$; $C_0 + C = 12,0326$; $A_0 = 854$; $r^2 = 0,054$; $RSS = 1,94$)



Spherical model ($C_0 = 32,500$; $C_0 + C = 68,630$; $A_0 = 506$; $r^2 = 0,873$; $RSS = 193,$)