

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E A  
PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM ÁREAS  
SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS  
AGRÍCOLAS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Vitor Cauduro Girardello**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**



# **ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM ÁREAS SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

**por**

**Vitor Cauduro Girardello**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de Mecanização Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

Girardello, Vitor Cauduro, 1981- G515q

Atributos físicos do solo e a produtividade de soja e milho em área sob tráfego controlado de máquinas agrícolas/ Vitor Cauduro Girardello. – Santa Maria, 2014.

135 f.; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2014.

“Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado”

1. Engenharia agrícola 2. Tráfego de máquinas 3. Propriedades físicas do solo 4. Compactação do solo 5. Agricultura de precisão. Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título

CDU: 631.58

Ficha catalográfica elaborada por  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

---

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Vitor Cauduro Girardello. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho é permitida, desde que citada a fonte – “O Autor”.

Endereço: Rua Tranquilo Basso, n. 421, Bairro: Centro.

Tapejara, RS, CEP: 99950-000

Fone:(46) 9125 -3004; End. Eletr: [vitorgirardello@gmail.com](mailto:vitorgirardello@gmail.com)

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

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA E  
MILHO EM ÁREAS SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS  
AGRÍCOLAS**

elaborada por  
**Vitor Cauduro Girardello**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Antonio Luis Santi, Dr. (UFSM/CESNOR)**

---

**Rodrigo da Silveira Nicoloso Dr. (EMBRAPA)**

---

**Reges Durigon, Dr. (UFSM)**

---

**Mastrangêlo Enivar Lanza Nova, Dr. (UERGS)**

Santa Maria, 27 de Fevereiro de 2014.



*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)*



## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pela força de sempre lutar por aquilo que acredito.

Aos meus pais, José Carlos Girardello, o seu Zé, meu pai e Fátima Cauduro Girardello, minha mãe, a Fatinha, por sempre me incentivar, me apoiar em todos meus objetivos, pelas palavras de encorajamento, obrigado pela educação e pelo carinho e pelo exemplo que tenho recebido de vocês dois.

Um grande agradecimento para meus irmãos Vanessa e Raul por toda a alegria e união de nossa família, juntamente com o Christian, Arthur Jerônimo e a Fernanda que foram se agregando e hoje fazem parte da família.

À todos meus familiares, que mesmo distante sempre estiveram comigo nesta longa caminhada, mesmo aqueles que estão somente na lembrança, como o Vovô Luiz, Vovó Eva, ao Tio Heleno e a Aline que durante o nosso tempo de convívio físico me ensinaram muitas coisas além de todo amor.

À Universidade Federal de Santa Maria, e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola que me acolheu como aluno e a CAPES, pela bolsa de doutorado.

Aos colegas do tempo de graduação e agora na pós-graduação Jardes Bragagnolo e Gustavo Teló pela amizade, carinho, incentivo para a realização dos trabalhos e estudos, companheiros inseparáveis por toda a vida.

Aos alunos colegas, amigos de *Projeto Aquarius* que voluntariamente auxiliaram na execução deste trabalho, pela amizade e companherismo. À todos os parceiros do projeto Aquarius (AGCO, Cotrijal, Yara, Stara) que nunca mediram esforços para que eu conseguisse realizar toda a minha investigação científica, agradeço ainda de forma especial a Fazenda Anna em Não Me Toque, RS e a família Tasca na cidade de Céu Azul, no estado do Paraná. A todos meus amigos que de forma direta ou indireta contribuíram para eu alcançar o meu objetivo, muito obrigado.

Ainda, agradeço a professora Dr.<sup>a</sup> Paula Misiewicz que foi minha supervisora durante o doutorado sanduiche na Harper Adams Univesity, na cidade de Newport, Inglaterra, juntamente com a aluna de PhD Emily Shmidt, agradeço eternamente pela sua acolhida, sua paciência, pelos seus ensinamentos técnicos e de língua inglesa, muito obrigado por me acolher e me dar a oportunidade única de morar na terra da rainha.

Ao amigo e orientador professor Telmo Amado pela sua pela paciência, ensinamentos acadêmicos e de vida.

Muito Obrigado.



## **RESUMO**

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM ÁREAS SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

AUTOR: VITOR CAUDURO GIRARDELLO  
ORIENTADOR: PROF. TELMO JORGE CARNEIRO AMADO  
Local e data da Defesa: Santa Maria, 27 de Fevereiro de 2014.

A compactação do solo tem sido induzida no sistema de plantio direto (SPD), principalmente devido ao tráfego de máquinas em condições de solos com elevada umidade. Este tráfego dentro da lavoura é essencial para o manejo das culturas, impossível de ser extinto de dentro da lavoura. Como alternativa para tentar solucionar este problema surge o conceito do sistema de tráfego controlado de máquinas, que é o confinamento e a separação permanente dos locais de tráfego de máquinas dos locais livre de tráfego. Neste sentido foi conduzido um experimento com duração de dois anos em uma área comercial, manejada sob o SPD utilizando técnicas de AP no município de Não Me Toque, RS. O solo do local é um Latossolo Vermelho com clima subtropical do tipo Cfa úmido segundo a classificação de Koppen. A precipitação média oscila entre 1.500 a 1.700 mm e a temperatura média anual é de 18.7°C. Os tratamentos investigados foram: a) Sem tráfego (ST); b) Tráfego do pulverizador (TP); c) Tráfego do trator (TT) e d) Tráfego máximo (TM). As principais avaliações foram: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (mi), porosidade total (pt), nas camadas 00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, infiltração de água, resistência a penetração (RP), avaliação do sistema radicular e produtividade da culturas de milho e soja. Na cidade de Céu Azul, PR também foi realizado um experimento visando estudar o disciplinamento do tráfego dentro de uma lavoura comercial, com tratamentos similares aos utilizados no RS, porém com a cultura da soja. Os resultados obtidos no RS demonstraram que o tráfego de máquinas ocasionou o aumento da Ds e da RP, a redução da Ma e infiltração de água no solo, além de causar uma redução de até 24,0 e 42,0% na produtividade da cultura do milho e soja respectivamente. Foi obtida uma relação positiva ( $r^2 = 0,70$ ) entre o aumento do número de passadas do trator e a RP. Os resultados obtidos no Paraná foram observados que os tratamentos com o tráfego de máquinas apresentaram 8% a menos na produtividade das culturas, embora as alterações nos atributos físicos do solo não sofreram alterações significativas após o tráfego. De acordo com os dois experimentos investigados, constatou-se que o sistema de tráfego controlado possui viabilidade na sua implementação e proporcionou melhoria nas condições físicas do solo e aumento na produtividade da cultura do milho e da soja no sul do Brasil.

**Palavras-chaves:** Propriedades físicas do solo, compactação do solo, agricultura de Precisão.

## **ABSTRACT**

Doctoral Thesis  
Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

## **SOIL PHUSICAL PROPERTIES AND YELD UNDER CONTROLLED TRAFFIC FARMING**

**AUTHOR: VITOR CAUDURO GIRARDELLO**

**ADVISER: PROF. TELMO JORGE CARNEIRO AMADO**

**Date and Place of Defense: Santa Maria, February 27<sup>th</sup>, 2014.**

The Soil compaction has been induced in the no-tillage (NT), mainly due to machinery traffic conditions in soils with high humidity. This traffic is essential for crop management, impossible to put out of the field. Alternatively to try to solve this problem the concept of controlled traffic system (CTF) of machines, which is the containment and permanent separation of local traffic machine of free traffic. In most incipient case of disciplined traffic system of the machines is an initial alternative to full deployment. In this sense an experiment was conducted during two crop years in a commercial area, managed under the NT using techniques of AP in the Não Me Toque city, RS state. The soil is Red Latossol with Cfa climate following Koppen classification. The treatments were: a) No Traffic (ST) b) traffic Spray (TP) c) Traffic Tractor (TT) and d) Maximum Traffic (TM). The assessments were: bunk density, macroporosity, microporosity, total porosity in the soil layers: 00-0.05; 0.05 – 0.10; 0,10 – 0.20 e 0.20 -0.30 m , water infiltration, penetrometer resistance (PR), root systems and yield in the corn and soybean. In Céu Azul city, PR state, have another experiment was also conducted to study the traffic discipline within the commercial fields, but only soybean field and with similar treatments to those used in RS. The results obtained in Paraná was observed that treatments with control traffic farming had 8% less yield. Changes in soil physical properties not change significantly after the traffic. In the two case investigated it was found that the controlled traffic has feasibility in implementation and improvement in soil physical properties and increased yeld of corn and soybeans in southern Brazil.

**Keywords:** Physical Attributes Soil, Controlled Traffic Farming, Precision Agriculture.

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1** – Resultado da análise de fertilidade do solo, antes da implantação do experimento em dois diferentes locais um Latossolo Vermelho distrófico. LVd, Não Me Toque – RS, 2010. ....36
- Quadro 2** – D ensidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), no momento do pleno florescimento do milho no ano de 2011 em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS.....49
- Quadro 3** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), após a colheita da soja no ano de 2012 em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS. ....51
- Quadro 4** – Produção média da massa seca da parte aérea da cultura do milho no ano de 2010/11 e da soja no ano 2011/12 em função dos diferentes tratamentos em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS.....83
- Quadro 5** – Número de grão, numero de 2<sup>a</sup> espigas, numero de fileiras por espiga, numero de grãos por fileira e peso de 100 grãos (g) em função do tráfego de máquinas, Não Me Toque – RS.....85
- Quadro 6** – Número de grãos por vagens, número total de vagens e peso de 1000 grãos (g) em função do tráfego de máquinas. Não Me Toque - RS.....85
- Quadro 7** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), após a semeadura da soja Latossolo Vermelho. Céu Azul, PR. ....116
- Quadro 8** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), no florescimento da soja Latossolo Vermelho. Céu Azul, PR.118



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Dinâmica da compactação do solo e suas diferentes formas de atuação adaptada. .... 24
- Figura 2** – Localização espacial do experimento dentro do estado do Rio Grande do Sul, com detalhamento do talhão Schmidt e blocos experimentais. Não Me Toque. .... 35
- Figura 3** – Resistência a Penetração (RP) na caracterização inicial antes da instalação do experimento. Com destaque para o valor crítico de RP e classificada de acordo com Arshad et al. (1996). Não Me Toque- RS. .... 36
- Figura 4** – Precipitações diárias e acumuladas na fazenda Anna, município de Não Me Toque (RS), durante o ciclo da cultura do milho (A) e da soja (B). Fonte: Fazenda Anna. .... 38
- Figura 5** – Representação simplificada dos tratamentos e dos locais das determinações do experimento a campo durante 2 anos de avaliação. Não Me Toque (RS)... 39
- Figura 6** – Ordem cronológica das determinações a campo e a intervenções realizadas no experimento. Não Me Toque, RS. .... 40
- Figura 7** – Relação entre densidade do solo e macroporosidade de um Latossolo Vermelho distrófico, com diferentes intensidade de tráfego de máquinas (n = 16). Não Me Toque – RS. .... 50
- Figura 8** – Infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a semeadura do milho, novembro de 2010. .... 52
- Figura 9** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a semeadura da soja, novembro de 2010. .... 54
- Figura 10** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a colheita da soja, abril de 2012... 55
- Figura 11** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes épocas de determinação e tratamentos. Não Me Toque, (RS). Onde: DSM = depois da semeadura do milho, DCM = depois da colheita do milho e DCS = depois da colheita da soja. .... 56
- Figura 12** – Variação da densidade do solo (Ds) após diferentes intensidades de tráfego do trator (A), do pulverizador (B) e do tráfego máximo (C). Com destaque para o valor crítico de Ds obtido em função da macroporosidade limitante proposta por Reinert et al. (2001). Não Me Toque- RS. Onde: Início do experimento = ausência de tráfego, após semeadura do milho = 1 passada de trator+ 1 passada de pulverizador, após semeadura da soja = 2 passadas de trator + 6 passadas de pulverizador. Não Me Toque- RS. .... 57
- Figura 13** – Variação da macroporosidade solo (Ma) após diferentes intensidades de tráfego do trator (A), do pulverizador (B) e do tráfego máximo (C). Com destaque para o valor crítico proposto por Reinert et al. (2001). Não Me Toque- RS. Onde: Início do experimento = ausência de tráfego, após semeadura do milho = 1 passada de trator+ 1 passada de pulverizador, após semeadura da soja = 2 passadas de trator + 6 passadas de pulverizador. Não Me Toque- RS. .... 60
- Figura 14** – Resistência a Penetração (RP) em diferentes épocas de avaliação sendo (A), após semeadura do milho (2010). Após semeadura da soja no ano de 2012 (B) e após a colheita da soja em 2012 (C) com destaque para o limite

	crítico e classificada de acordo com Arshad et al. (1996) em um Latossolo Vermelho, Não Me Toque – RS.....	63
<b>Figura 15</b>	– Resistência do Solo a Penetração (RP) em função do número de passadas do trator (A), do pulverizador autopropelido (B) e pulverizador do pulverizador autopropelido + trator (C) em um Latossolo Vermelho e classificada de acordo com Arshad et al. (1996), durante dois anos de avaliação, Não Me Toque – RS. Onde: T0 = Ausência de tráfego, T1 = uma passada do pulverizador e do trator e T2 = quatro passadas de pulverizador mais duas do trator.....	66
<b>Figura 16</b>	– Distribuição do volume de raízes do milho na safra agrícola 2010/2011 (A) e da soja na safra agrícola (2011/2012). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. (p<0.05), Não Me Toque - RS. Onde: ST = Sem tráfego, TP = Tráfego do pulverizador autopropelido, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo. ....	87
<b>Figura 17</b>	– Comprimento total das raízes do milho, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Não Me Toque - RS. ....	88
<b>Figura 18</b>	– Comprimento total das raízes da soja, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Não Me Toque - RS. ....	90
<b>Figura 19</b>	– Produtividade média da cultura do milho na safra agrícola 2010/2011 (A) e da soja na safra agrícola (2011/2012). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. (p<0.05), Não Me Toque - RS. Onde: ST = Sem tráfego, TP = Tráfego do pulverizador autopropelido, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo. ....	92
<b>Figura 20</b>	– Talhão do experimento de tráfego controlado, em destaque o posicionamento dos blocos. Céu Azul, PR. ....	107
<b>Figura 21</b>	– Representação simplificada dos tratamentos e dos locais das determinações do estudo de caso. Céu Azul (PR). ....	110
<b>Figura 22</b>	– Resistência a Penetração (RP) na caracterização inicial após a semeadura da soja (A) e no momento do pleno florescimento da cultura (B), classificada de acordo com Arshad et al. (1996). Onde: ST = Sem tráfego, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo. Céu Azul- PR. ....	119
<b>Figura 23</b>	– Resistência a Penetração (RP) após a semeadura da soja (A) e no pleno florescimento da soja (B), espaçado equidistante em relação a linha de tráfego do trator e linhas de semeadura Céu Azul- PR. ....	121
<b>Figura 24</b>	– Distribuição do volume de raízes de soja, no perfil do solo, em função dos tratamentos ST = Sem tráfego, TP = tráfego do pulverizador, TT = tráfego do trator e TM tráfego máximo. Céu Azul- PR. ....	123
<b>Figura 25</b>	– Comprimento total das raízes da soja, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Céu Azul-PR.....	124
<b>Figura 26</b>	– Produtividade média da cultura da soja, onde: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. (p<0.05), Céu Azul - PR. ....	125

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL .....	19
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	23
2.1	Compactação do solo.....	23
2.2	Alternativas para solucionar a compactação do solo.....	24
2.3	Sistema de Tráfego Controlado .....	25
2.4	Vantagens e desvantagens do sistema de tráfego controlado .....	26
2.5	Procedimento para a instalação do sistema .....	27
2.5.1	Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) .....	27
2.5.2	Ajuste de bitolas .....	28
2.5.3	Uso do sistema de orientação e pilotos automáticos .....	29
2.6	Resultados obtidos com o sistema de tráfego controlado.....	30
2.7	Produtividade das culturas sob o sistema de tráfego controlado .....	31
3	HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	33
3.1	Hipótese .....	33
3.2	Objetivo Geral .....	33
3.3	Objetivos Específicos .....	33
4	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL .....	35
4.1	Local do Experimento .....	35
4.2	Condições Climáticas .....	36
4.3	Tratamentos .....	38
4.4	Caracterização das Máquinas Agrícolas.....	40
5	CAPITULO I .....	43
5.1	Introdução.....	45
5.2	Material e Métodos.....	47
5.3	Resultados e Discussão.....	48
5.3.1	Florescimento do Milho 2011.....	48
5.3.2	Após a colheita da Soja 2012 .....	51
5.3.3	Infiltração de água no solo.....	52
5.3.4	Variação da densidade e macroporosidade em função do tráfego.....	56
5.3.5	Resistência do Solo à Penetração (RP).....	62
5.3.6	RP em função do numero de passadas.....	64
5.4	Conclusões.....	69
5.5	Referências Bibliográficas.....	71
6	CAPITULO II.....	75
6.1	Introdução.....	76
6.2	Material e Métodos.....	79
6.2.1	Localização e tratamentos .....	79
6.2.2	Determinação da produção de massa seca.....	79
6.2.3	Avaliação do sistema radicular.....	79
6.2.4	Produtividade.....	80
6.2.5	Delineamento Experimental .....	81
6.3	Resultados e Discussão.....	83
6.3.1	Produção de massa seca da parte aérea .....	83
6.3.2	Componentes de rendimento .....	84
6.3.3	Sistema Radicular .....	86
6.3.4	Produtividade das culturas.....	91
6.4	Conclusões.....	95

6.5	Referências Bibliográficas .....	97
7	CAPITULO III .....	103
7.1	Introdução .....	105
7.2	Material e Métodos .....	107
7.2.1	Localização do experimento .....	107
7.2.2	Histórico de manejo sistema de tráfego controlado parcial .....	108
7.2.3	Tratamentos.....	110
7.2.4	Máquinas utilizadas.....	110
7.2.4	Propriedades físicas do Solo .....	112
7.2.5	Produtividade de grãos.....	113
7.2.6	Delineamento experimental .....	113
7.3	Resultados e Discussão .....	115
7.3.1	Propriedades Físicas.....	115
7.3.3	Produtividade da cultura da soja .....	125
7.4	Conclusões .....	127
7.5	Referencias Bibliográficas .....	129
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
9	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	137

# 1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura atual exige cada vez mais a profissionalização dos processos produtivos, pequenos detalhes são o diferencial para que se consiga produtividade necessária para a manutenção do homem ao campo. A pressão pelo aumento da produtividade associado com o melhor aproveitamento dos recursos naturais tais como, o melhor aproveitamento da água, menor contaminação ambiental com o uso de agroquímicos, menor degradação de solo, principalmente devido à erosão, são questões que vem sendo discutida pela sociedade atualmente, encontrando respaldo no sistema de plantio direto (SPD) e mais recentemente o uso da agricultura de precisão (AP) uma alternativa viável.

Nos últimos anos a AP, vem sendo utilizada por técnicos e produtores em busca maiores produtividade, mais responsabilidade ambiental sem aumentos significativos da área cultivada. Uma vasta gama de alternativas pode ser usada na AP, destacando primeiramente a aplicação de fertilizantes em taxa variada, uso de precisão nas semeaduras, mapeamento em tempo real da produtividade, possibilidade de escarificações sítio-específico, uso do sistema de piloto automático para que se consiga o máximo de informações sobre a lavoura, facilitando assim a tomada de decisão pelos atores do sistema produtivo.

Neste contexto de inovação e busca de alternativas viáveis para aumentar a eficiência na agricultura é que surge o sistema de tráfego controlado, que já vem sendo estudada em países como Austrália, EUA, Inglaterra, Alemanha, Argentina entre outros, no Brasil este sistema tem sido aplicado em maior escala na cultura da cana de açúcar principalmente, já na produção de grãos, seu estudo e sua aplicação são incipientes, principalmente na região sul e centro oeste do país.

O sistema de tráfego controlado surge com o conceito de controlar, disciplinar o tráfego de máquinas dentro da lavoura, criando locais específicos de trânsito dentro da área, isolados do restante da lavoura que ficam livres deste trânsito, evitando assim o tráfego aleatório dentro da lavoura. Este confinamento das linhas de tráfego vai gerar “verdadeiras estradas”, que recebem o nome da “*tramline*”, melhorando assim o desempenho operacional das máquinas e equipamentos envolvidos no processo, evita o surgimento aleatório da compactação do solo causada pelo peso das máquinas, e mantendo uma grande área livre do tráfego de máquinas dentro do talhão. Esta ausência de tráfego vai permitir que as culturas se desenvolvam em solo isentos de compactação, de problemas gerado pelo amassamento de

rodados, influenciando assim positivamente o desenvolvimento e a produtividade final das culturas.

O conhecimento da dinâmica da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas é de fundamental importância para o entendimento mais amplo do sistema proposto de tráfego controlado, priorizando os estudos em condições reais de lavoura, o chamado estudo “*in loco*”, uma vez que estudo em condições controladas não conseguem repetir as variabilidades existentes na lavoura comercial.

Muitos estudos sobre o tema são desenvolvidos simulando o peso de máquinas, utilizando para isso rolos compactadores, pá carregadoras entre outras que não trafegam normalmente dentro da lavoura durante o desenvolvimento das culturas. Outra simulação é a intensidade de tráfego utilizada, uma vez que normalmente é usado o expediente de sucessivas passadas, com condições de umidade uniforme em toda a área estudada, condições estas que não existem dentro de uma área comercial.

Neste ponto o ineditismo desta pesquisa reside no fato de que ela foi realizada exatamente nas condições de campo, em que o tráfego de máquinas aconteceu na época determinada pelo manejo da cultura, com intervalos de tempo entre as passadas e em condições de umidade de solo diferentes. O fator negativo neste tipo de experimento é a dificuldade no entendimento específico de cada processo, de forma a isolar os fatores em busca de respostas, porém com experimentos “*in loco*” se consegue uma real abrangência sobre a dinâmica da interação solo-máquina em áreas comerciais.

Esta tese tem como objetivo entender a complexa dinâmica e interação entre tráfego de máquinas dentro da lavoura e a compactação do solo, mensurando quais as alterações nas propriedades físicas do solo e na produtividade das culturas em área comercial na região do planalto do estado do Rio Grande do Sul e no sudoeste do Paraná.

A divisão deste estudo em três capítulos diferentes visa o melhor entendimento do experimento que foi realizado em duas safras agrícolas, no ano de 2010/11 com a cultura do milho e no ano de 2011/12 com a cultura da soja, na cidade de Não Me Toque, estado do Rio Grande do Sul. O primeiro capítulo explora o tráfego de máquinas e sua influência nas modificações das propriedades físicas do solo (densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total) além da infiltração de água no solo e resistência a penetração em função dos tratamentos.

No segundo capítulo, a discussão é baseada nas modificações que aconteceram nas culturas após o tráfego de máquinas, com ênfase nas alterações do sistema radicular, na produção de massa seca e na produtividade de ambas as culturas estudadas.

Por fim, no capítulo três, apresenta um estudo de caso na cidade de Céu Azul, no estado do Paraná, em que uma propriedade comercial que vem utilizando o sistema de tráfego controlado a mais de quatro anos na cultura da soja.



## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

A demanda crescente por alimentos exige cada vez mais que os produtores obtenham maiores produtividades em suas lavouras. Neste sentido os detalhes da produção são essenciais para se conseguir maiores produtividade na mesma área de lavoura utilizada até então. A tomada de decisão deve ser a mais correta possível e sempre baseada na maior quantidade de informações disponíveis, e neste sentido o uso da agricultura de precisão (AP) é uma das ferramentas que apresenta elevado potencial para ser usada. O conceito central da AP é a identificação e o tratamento diferencial da variabilidade espacial e temporal existente no solo e nas plantas (AMADO et al., 2007).

A evolução da AP foi possível devido à liberação para uso civil e comercial do sinal de GPS (Global Position Systems), sendo os primeiros trabalhos relatados no Brasil por Molin (1977) e Balastriere (1998). Em nível mundial o desenvolvimento desta técnica é acelerado, sendo que nos trabalhos pioneiros buscou-se identificar e entender a variabilidade espacial e temporal do solo e suas correlações com o rendimento final da cultura, passando pelos atributos físicos e biológicos, planejamento conservacionista, na atualidade ao uso de robótica e o manejo individualizado de plantas dentro da lavoura, sistema de controle de tráfego são itens que paulatinamente vem sendo estudados (GODWIN, 2009).

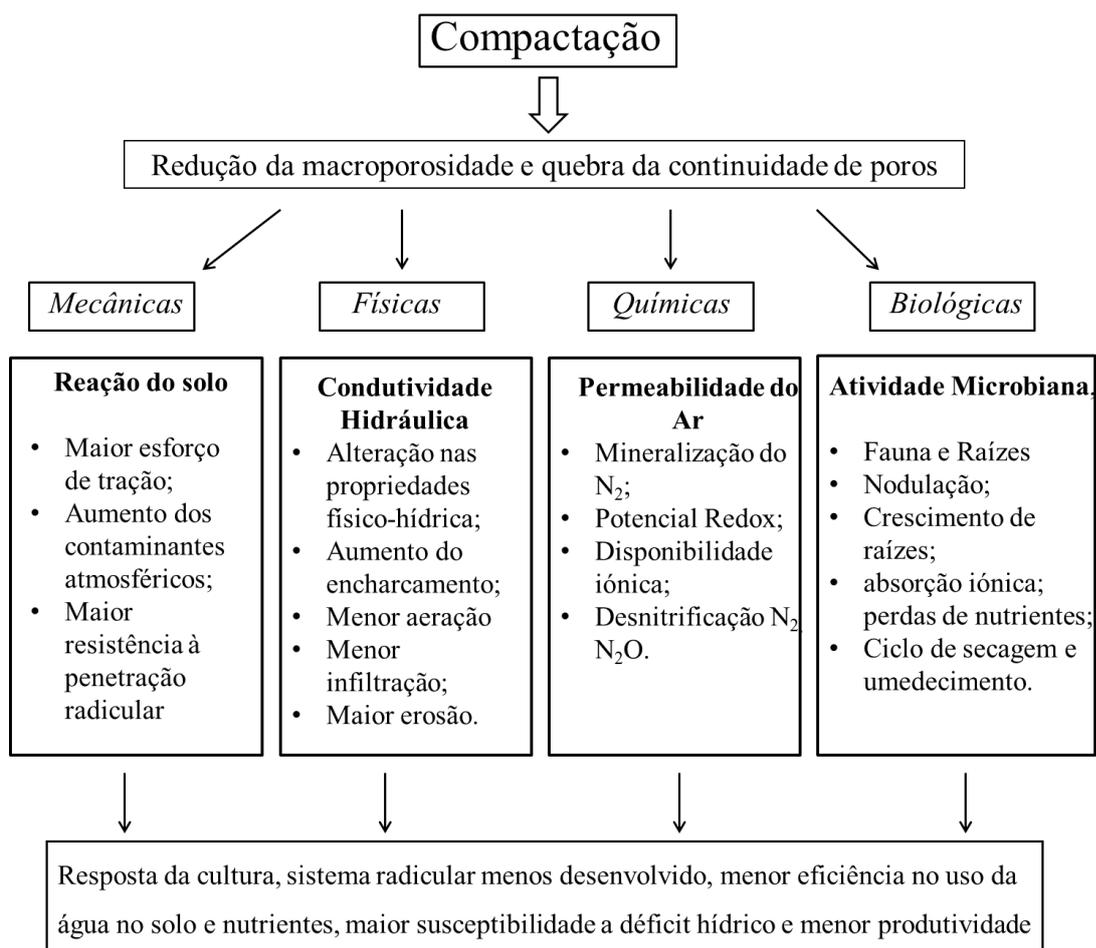
O uso de técnicas de AP vem apresentando de forma promissora a automação de operações com máquinas e equipamentos, especialmente no manejo de semeadura e aplicação de agroquímicos nas culturas, sendo a utilização do sistema de piloto automático a que se encontra em maior nível de aplicação e desenvolvimento, gerando inúmeras possibilidades de atuação na agricultura moderna (NETO et al., 2011). Atualmente, a Austrália e alguns países europeus como Alemanha, Inglaterra apresentam a maior área com este sistema em execução (TULLBERG et al., 2010).

### **2.1 Compactação do solo**

Dentro desta nova tendência, as propriedades físicas do solo, começam a ganhar maior destaque nas pesquisas, uma vez que os problemas de compactação do solo são

reconhecidos atualmente como um dos maiores causadores do decréscimo da produtividade em áreas sob sistema de plantio direto (HAMZA & ANDERSON, 2005).

A compactação do solo é complexa de ser investigada, sendo definida por Curi et al. (1993) como a diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, acarretando um rearranjo mais denso das partículas do solo e conseqüente redução da porosidade, enquanto adensamento é a redução natural do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade de camadas. O adensamento é um fenômeno natural enquanto a compactação é resultado da ação antrópica, modificando todas as propriedades do solo e sua dinâmica é apresentada na figura 1.



**Figura 1** – Dinâmica da compactação do solo e suas diferentes formas de atuação. Fonte: Boone, 1986.

## 2.2 Alternativas para solucionar a compactação do solo

Após a confirmação da existência da compactação do solo, buscam-se alternativas para resolver este problema. Entre as possibilidades existentes para este fim, destacam-se a

escarificação mecânica e a escarificação biológica do solo. A escarificação mecânica esporádica é sugerida por (KLEIN & CAMARA, 2005) como uma solução temporária na solução do problema de compactação. Já para Nicoloso et al.(2008) uma alternativa em caso mais severos, é a atuação junto com a escarificação mecânica de plantas de cobertura com o sistema radicular mais agressivo, maior produção de biomassa (escarificação biológica), que consigam romper esta camada compactada do solo.

A escolha da escarificação mecânica para solucionar o problema de compactação do solo, deve ser considerada somente em caso extremos, devido ao elevado custo financeiro, energético e ambiental, através do aumento do risco de erosão, redução dos teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS), incorporação da cobertura vegetal, desgaste de máquinas e equipamento e a existência de dúvidas sobre a melhoria na produtividade. A prevenção da ocorrência e o confinamento da compactação parece ser a melhor forma de se prevenir este problema (CHAMEN, 2011).

### **2.3 Sistema de Tráfego Controlado**

Um dos principais motivos da criação sistema de tráfego controlado é o da prevenção da ocorrência da compactação do solo causada tráfego de máquinas dentro da lavoura, disciplinando as vias de tráfego dentro da área, além de alternativas que devem ser consideradas tais como as citadas por Tijink (1994) que são o uso de baixa pressão de insuflação dos pneus, baixa carga por eixo, construção do pneu radial entre outras medidas que podem ser facilmente realizadas. Outro fator importante é a numero de passadas que a máquina realiza na mesma faixa de trânsito dentro da lavoura (BOTTA et al., 2012).

O tráfego controlado possui como conceito central o de organizar, disciplinar e facilitar o trânsito de todas as máquinas e equipamentos envolvidos no processo produtivo em uma área comercial, restringindo as linhas de tráfego das máquinas e equipamentos em locais específicos (LAGUË et al., 2003), buscando manter a área de tráfego permanentemente separadas da área livre de trânsito (CHAMEN et al., 1992, GAFFNEY & WILSON, 2003; RAPER & KIRBY, 2006) com o auxílio de máquinas equipadas com o sistema de piloto automático e sistemas de localização geográfica (RAPER, 2005; BOCHTIS & VOUGIOUKAS, 2008).

A principal vantagem deste sistema é que os locais isentos do contato dos pneus apresentam maiores rendimentos das culturas, devido a ausência da compactação do solo (BLACKWELL, et al ., 2003; TULLBERG al., 2007). O controle e disciplinamento do tráfego dentro da lavoura esta associado a execução da agricultura de precisão (AP), neste caso sua utilização vai proporcionar, através do planejamento e o manejo específico do tráfego de máquinas, o aumento do desempenho da AP no processo produtivo (GASSEN, 2011).

## **2.4 Vantagens e desvantagens do sistema de tráfego controlado**

A implantação plena deste sistema apresenta algumas vantagens que garantem maior segurança na sua utilização quando comparada com as possíveis desvantagens da utilização deste sistema.

Vantagens:

- Menor área de solo recebe influência negativa do rodado das máquinas e equipamentos.
- Menor consumo de combustível e força requerida para o deslocamento das máquinas envolvidas no sistema.
- Menor o risco do surgimento da compactação superficial e subsuperficial aleatoriamente dentro da lavoura.
- Menor perda de solo e de água, devido à ausência da compactação.
- Menor distância total percorrida pelas máquinas dentro da área.
- Maior eficiência na logística e no trânsito dentro da lavoura.
- Maior rendimento das culturas nos locais livres de trânsito.
- Melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Desvantagens

Algumas desvantagens quando se faz o uso do sistema de tráfego controlado podem ocorrer e devem ser observadas no momento da tomada de decisão sobre a implantação do sistema:

- Custo financeiro elevado para a obtenção dos sistemas de localização geográfica (GPS, RTK).
- Softwares específicos para AP podem representar alguma dificuldade de aquisição em função do seu valor financeiro e alta demanda de conhecimento das pessoas envolvidas neste processo.
- Necessidade do ajuste de bitola das máquinas.

## 2.5 Procedimento para a instalação do sistema

Para a implantação do sistema de tráfego controlado é necessário à realização de alguns procedimentos prévios a entrada das máquinas dentro do talhão. Alguns pontos importantes serão considerados a seguir.

### 2.5.1 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

A implantação do sistema deve obedecer algumas regras, sendo a primeira a ser seguida para que se tenha um sistema com maior eficiência é o levantamento planialtimétrico da área onde vai ser implantado o tráfego controlado, este levantamento também recebe o nome de Modelo Digital de Elevação (MDE) sendo à base de dados fundamentais para o planejamento das atividades agrícolas (EMBRAPA, 2012), que será utilizada para a determinação do sentido, largura das linhas de semeadura, bem como os locais de manobra, entrada e saída do talhão.

O MDE é composto por coordenadas geográficas em três dimensões (X, Y e Z). Para se conseguir uma maior precisão neste levantamento, é necessária a utilização do *Differential Global Positioning System* (DGPS) conseguindo assim redução do erro de até 10 metros no *Global Positioning System* (GPS), para um erro de aproximadamente 0,10 metros com o uso do DGPS. A escolha da acurácia do sinal é influenciada pela operação que se deseja realizar (BARROS et al., 2005) um cuidado que deve-se tomar é o tempo de permanência no ponto, quanto maior o tempo de permanência no ponto menor é o erro (MARÍN et al., 2005).

O sistema de tráfego controlado necessita de uma precisão centimétrica e por isso faz-se necessário à utilização do DGPS no levantamento inicial, durante a execução do

trabalho a campo, um cuidado que se deve tomar é o tempo entre dois passes consecutivos, se ele for maior que 15 min, o erro de tempo de deslocamento tem que ser levado em consideração e somente o sinal do RTK terrestre pode garantir estabilidade de tempo e posicionamento repetitivo e exato no tempo (Kroulík et al., 2010).

Além do levantamento da cota real nas extremidades da área, é importante que o mesmo seja feito em pontos centrais observando a topografia do terreno, buracos, ou mesmo outros obstáculos para o trânsito das máquinas, pois no momento da edição e pós-processamento dos dados se estas informações serão utilizadas para o MDE. Após a obtenção destes pontos, com auxílio de programas específico para AP, começa a geração virtual das linhas de semeadura, linhas permanentes para o tráfego do pulverizador, planejamento sobre os locais de descarga de grãos entre outras operações sujeitas a serem realizadas nas operações de semeadura, manejo da cultura e colheita.

### 2.5.2 Ajuste de bitolas

No segundo momento da implantação do sistema, acontece a operação que exige maior cuidado e complexidade que é o ajuste da bitola dos rodados de todas as máquinas envolvidas no sistema (Alba et al., 2012). A bitola é definida como sendo a distância entre o centro as duas rodas, tanto as dianteiras como nas traseiras, e ela vai possibilitar que se forme um padrão de distâncias e de repetibilidade das operações durante a execução do tráfego controlado. Além disso, o ajuste de bitolas permite melhorar nas condições de tráfego quando o solo apresentar maior teor de água, aumentando a eficiência de tração e melhorando a relação solo-máquina (Kingwell & Fuchsbichler, 2011), possibilitando assim que sejam feitas operações agrícolas independente da umidade presente no solo, permitindo uma maior eficiência no tempo e no cronograma de atividades (Souza et al., 2012).

A largura nominal de trabalho vai depender basicamente do tipo de maquinário disponível e da cultura que vai ser cultivada. Em geral opta-se por larguras de 3 m ou múltiplas. Porém, como este é um processo contínuo de adaptações e estudos, existe a possibilidade de alterar este espaçamento para 4 m conforme o descrito por (Kroulík et al., 2010). Para a cultura do milho, estas larguras devem ser consideradas em função do número de linhas da semeadura, e da plataforma de colheita, uma vez que as operações para esta cultura devem ser feitas de maneira associada. Cuidado este que não existe para as culturas como a soja, trigo, aveia entre outras culturas que não necessitam de plataformas específicas para a colheita (Alba et al., 2012)

### 2.5.3 Uso do sistema de orientação e pilotos automáticos

O uso do sistema de piloto automático (PA) em veículos na produção agrícola está ganhando cada vez mais importância (Stoll & Kutzbach, 2000). A sua utilização apresenta muitos fatores positivos sobre a utilização do sistema de PA (Cordesses et al., 2000; Han et al., 2004; Dunn et al., 2006), menciona o seguinte benefícios gerais sobre a utilização de sistemas de orientação com piloto automático:

- Menos impacto sobre o meio ambiente (redução da frequência de passagem de máquinas, redução de compactação do solo);
- Redução de custos acontece devido à redução da sobreposição entre os passes laterais;
- Aumento do rendimento operacional: velocidades de operações mais altas, aplicações podem ser feitas durante a noite, em épocas de maior demanda;
- Melhoria da qualidade de operação: o operador pode concentrar a atenção em outros lugares para garantir uma melhor qualidade do trabalho a ser realizado;
- Sistemas com controle de tráfego reduz a fadiga do operador, e fornece a oportunidade de empregar operadores menos qualificados, uma vez que todas as programações das linhas de tráfego são previamente definidas por especialistas;
- A melhoria da segurança, pois reduz a interferência do fator humano nas operações.

O sistema de PA é uma evolução do sistema de marcação de linhas de pulverização pelo sistema de barra de luzes, neste sistema o operador é parte ativa do sistema e deve tomar a decisão baseada em luzes de instaladas em frente no seu campo de visão que orientam o sentido e a intensidade da mudança de direção (Baio & Antuniassi, 2003). Pelo fato de ser uma operação manual, esta sujeita a erros que podem comprometer a eficiência destas operações (Baio, 2005).

A evolução dessa técnica é representada pelo conceito de piloto automático, que utiliza sinal de satélites com correção diferencial. O posicionamento do veículo é corrigido automaticamente por atuadores no volante, também chamados de piloto automáticos de ação mecânica ou roda de atuação acoplável ao volante, porém as manobras de cabeceira, ou mudanças de direção emergencial, são feitas manualmente, bastando o operador retomar o

controle (Oliveira & Molin, 2011). Outro sistema disponível é o que atua diretamente no sistema através de uma válvula eletro-hidráulica instalado no sistema de controle das rodas direcionais, possuindo maior tecnologia embarcada, garantido maior precisão nas operações que o outro sistema mecânico e sendo capaz de controlar a máquina de forma autônoma (Kroulík et al., 2010).

## **2.6 Resultados obtidos com o sistema de tráfego controlado**

As pesquisas sobre o sistema de tráfego controlado em lavouras de grãos, ainda são incipientes no Brasil, em um levantamento realizado em áreas produtoras de grãos, comparando diferentes sistemas de manejo concluíram que a área trafegada por máquinas dentro de uma lavoura no sistema de preparo convencional é de aproximadamente 82%, no sistema de plantio direto o tráfego atinge 46% e quando se utiliza o sistema de tráfego controlado, a redução é ainda maior, com 14% da área total da lavoura sofre pressão de pneus (Gassen, 2011). No ano seguinte Alba et al. (2010) encontrou valores considerado elevados no sistema de tráfego controlado, em uma lavoura comercial no primeiro ano de implantação do sistema de tráfego controlado 70% da área apresentou tráfego de máquinas, o mesmo ressalta que este resultado elevado, deve-se a presença de rodado duplo no trator e na colhedora, além da falta de alinhamento do pneus dianteiros com os traseiros.

Na Austrália o sistema de tráfego aleatório dentro da lavoura em uma safra agrícola, pode afetar cerca de 80-100% da área total da área, no sistema de preparo convencional e 30-60% em práticas conservacionistas de manejo (Radfor et al., 2000; Tullberg et al., 2007). Já em áreas com o controle de tráfego, o trânsito total na área pode atingir entre 10-20% da área total do campo trafegada (Wang et al, 2009; Tullberg, 2010).

A demanda energética foi estudada por Matthews (1982) verificou uma redução na demanda de energia necessária para a lavoura em 50% caso a pressão dos pneus fossem realizadas em locais com solos mais estruturados, esta redução energética pode ser reduzida ainda mais, principalmente com o disciplinamento e redução na quantidade de passes de máquinas dentro da área.

## 2.7 Produtividade das culturas sob o sistema de tráfego controlado

Um estudo sobre tráfego controlado nas culturas de milho, trigo e sorgo, realizado pela Aciar (1998), na Austrália, mostrou que o rendimento médio dos grãos cultivados sob o sistema de tráfego controlado foi 16% maior do que quando cultivados de maneira convencional, com o sistema de tráfego aleatório. No entanto, Raper & Kirby (2006) afirmaram que, apesar dos benefícios advindos com a adoção do controle de tráfego, o aumento de produtividade das culturas depende de inúmeros fatores tais como distribuição de chuvas, condições de solo e espécies de plantas.

Com a formação destas linhas de tráfego (trameline), o desempenho operacional de máquinas tende a melhorar (Li et al., 2007; Tullberg et al., 2007), através da redução da potência exigida, gerando uma redução do consumo de combustível na faixa de 40 a 50%. Trabalhos realizados na Austrália pela Aciar (1998) avaliando o sistema de plantio direto com tráfego controlado e tráfego aleatório, o parâmetro de maior redução foi o custo com combustível, reduzindo quase 60% quando se controlou o tráfego das máquinas.

A principal mudança do sistema de tráfego aleatório em relação ao sistema de tráfego controlado é a tentativa de solucionar o problema de compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas, que afeta o rendimento das culturas (Tullberg et al., 2007) e neste sentido Hakansson e Reeder, (1994) atribuíram à compactação do solo, causado pelo tráfego, uma redução no rendimento médio de cerca de 2%, medidos durante um experimento que durou 8 anos após quatro passagens de trator com peso 10 Mg em um único eixo. Este valor pode parecer pequeno, mas nas práticas agrícolas normais, cargas dessa natureza ou até mais pesadas são aplicadas anualmente.

Na cultura da cevada Alakukku (1997) reportou que a aplicação de uma carga por eixo de apenas 5 Mg no ano levou a uma redução da produção média de 5% no três anos de condução do experimento com os cereais de inverno, cevada, trigo e aveia em um solo com teores de argila de 48% com persistência da compactação de até três anos. Reeder & Wood Finck (1993) investigaram os efeitos do preparo profundo sobre as propriedades físicas em solo argiloso e na produtividade das culturas, determinaram que o tráfego controlado foi essencial para obter benefícios de longo prazo de subsolagem, verificaram ainda um aumento da produtividade do milho de 7,0 e 3,0% respectivamente nas safras de 1991 e 1992 em áreas isentas do trânsito de máquinas.

O uso associado de AP com o sistema de tráfego controlado no sistema de plantio direto (SPD) é de grande valia no contexto de da conservação do solo, uma vez que a semeadura passa a ser realizada no sentido transversal a declividade do terreno, desta forma as linhas de plantas forma uma espécie de barreira natural, que atuam no sentido de reduzir a velocidade de escoamento da enxurrada, fazem com que o total de perdas de solo e água verificados nesse ambiente seja baixo (DEBARDA, 1993; SEGANFREDO, 1995).

## **3 HIPÓTESE E OBJETIVOS**

### **3.1 Hipótese**

A utilização do sistema de tráfego controlado dentro da lavoura é eficiente para incrementar a produtividade das culturas de grãos, devido ao confinamento da compactação em locais onde existem o trânsito previamente planejado. É capaz de alterar as propriedades físicas do solo, influenciando no desenvolvimento das culturas.

### **3.2 Objetivo Geral**

Determinar a influência do tráfego das máquinas agrícolas dentro de uma lavoura comercial nas propriedades físicas do solo, no desenvolvimento do sistema radicular e seus reflexos na produtividade das culturas de grãos conduzidas sob o sistema de plantio direto em solo com elevado teor de argila.

### **3.3 Objetivos Específicos**

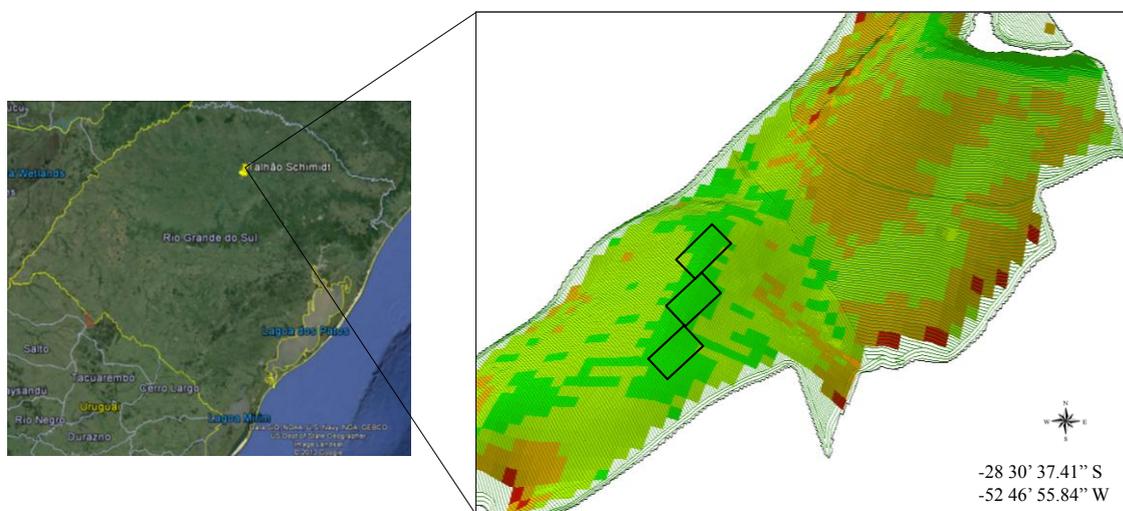
- Determinar alterações nas propriedades físicas do solo após a passagem de máquinas e equipamentos de diferentes pesos.
- Determinar o aumento da resistência a penetração do solo, após o tráfego de máquinas agrícolas e relacionar com o seu peso.
- Avaliar a produtividade das culturas de após a realização do tráfego controlado.

- Avaliar o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja e do milho após o tráfego de máquinas e implementos agrícolas durante dois anos de manejo das culturas.

## 4 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.1 Local do Experimento

O experimento foi conduzido em uma área comercial no município de Não-Me-Toque, pertencente à Fazenda Anna e possui 125 hectares (Figura 2) situado sob as coordenadas de latitude  $-28^{\circ}30'37.41''$  e longitude  $-52^{\circ}46'55.84''$ , seguindo o Datum WGS 84 e altitude média 471 m. O solo do local é classificado, segundo Embrapa (2006), com sendo um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura muito argilosa ( $>60\%$ ), com profundidade média de 1,5 metros.



**Figura 2** – Localização espacial do experimento dentro do estado do Rio Grande do Sul, com detalhamento do talhão Schmidt e blocos experimentais. Não Me Toque.

Através da indicação do produtor, foi determinada a fertilidade do solo (Quadro 1) e a RP (Figura 3) em uma área de periférica, onde existe a entrada de máquinas no talhão, depósito de fertilizantes, manobras de máquinas, local este que apresenta um histórico de baixa produtividade por mais de dez anos.

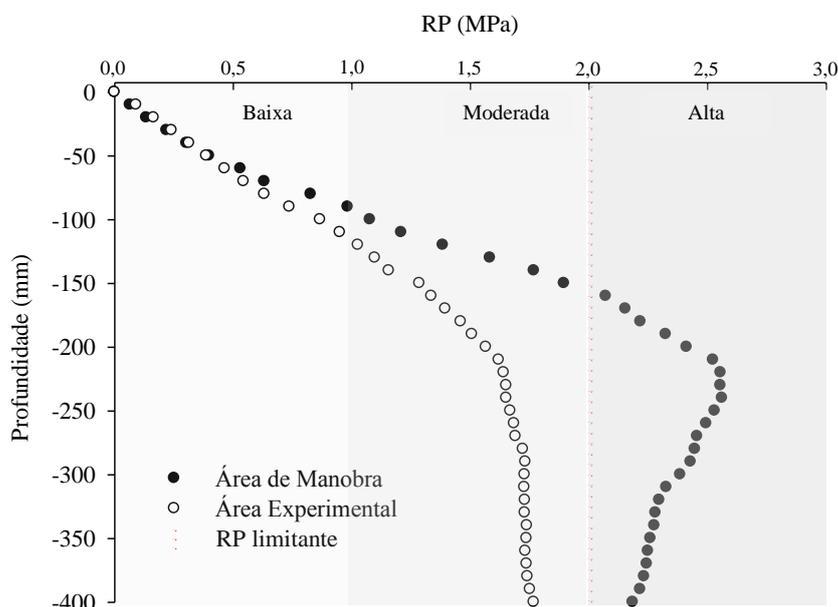
A fertilidade do solo, quando da instalação do experimento sugere que os teores de nutrientes não foram restritivos ao desenvolvimento das culturas nos anos estudados, não apresentando diferença entre os locais amostrados (área compactada e área experimental).

**Quadro 1** – Resultado da análise de fertilidade do solo, antes da implantação do experimento em dois diferentes locais um Latossolo Vermelho distrófico. LVd, Não Me Toque – RS, 2010.

Tratamentos	pH	SMP <sup>2</sup>	MOS <sup>3</sup>	P <sup>4</sup>	K <sup>4</sup>	Ca <sup>5</sup>	mg <sup>5</sup>	Al <sup>5</sup>	H+Al	V <sup>6</sup>	m <sup>7</sup>
	1:1		%	mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			---	%
Área de manobra	5,2	6,1	2,7	27,0	0,245	5,3	1,7	0,0	1,9	75	0
Área experimental	5,4	6,1	3,9	33,2	0,328	7,5	2,2	0,0	1,9	80	0

<sup>1</sup>pH em Água, <sup>2</sup>Índice SMP, <sup>3</sup>Matéria Orgânica do Solo, <sup>4</sup>Fósforo e Potássio (Mehlich-I), <sup>5</sup>Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis (KCl 1M), <sup>6</sup>Saturação por bases, <sup>7</sup>Saturação por Alumínio.

No mesmo sentido a determinação da RP visou isolar o efeito da compactação pré-existente na lavoura. É possível observar que na área onde foi instalado o experimento a resistência à penetração não apresentou valores considerados restritivos sendo que o máximo de RP foi de 1,71 MPa, abaixo do limite crítico. Já no local indicado pelo produtor os valores de RP atingiram 2,56 MPa segundo a classificação proposta por Arshad et al. (1996) considerado como alta. No momento das determinações a umidade volumétrica do solo era de 26,5%.



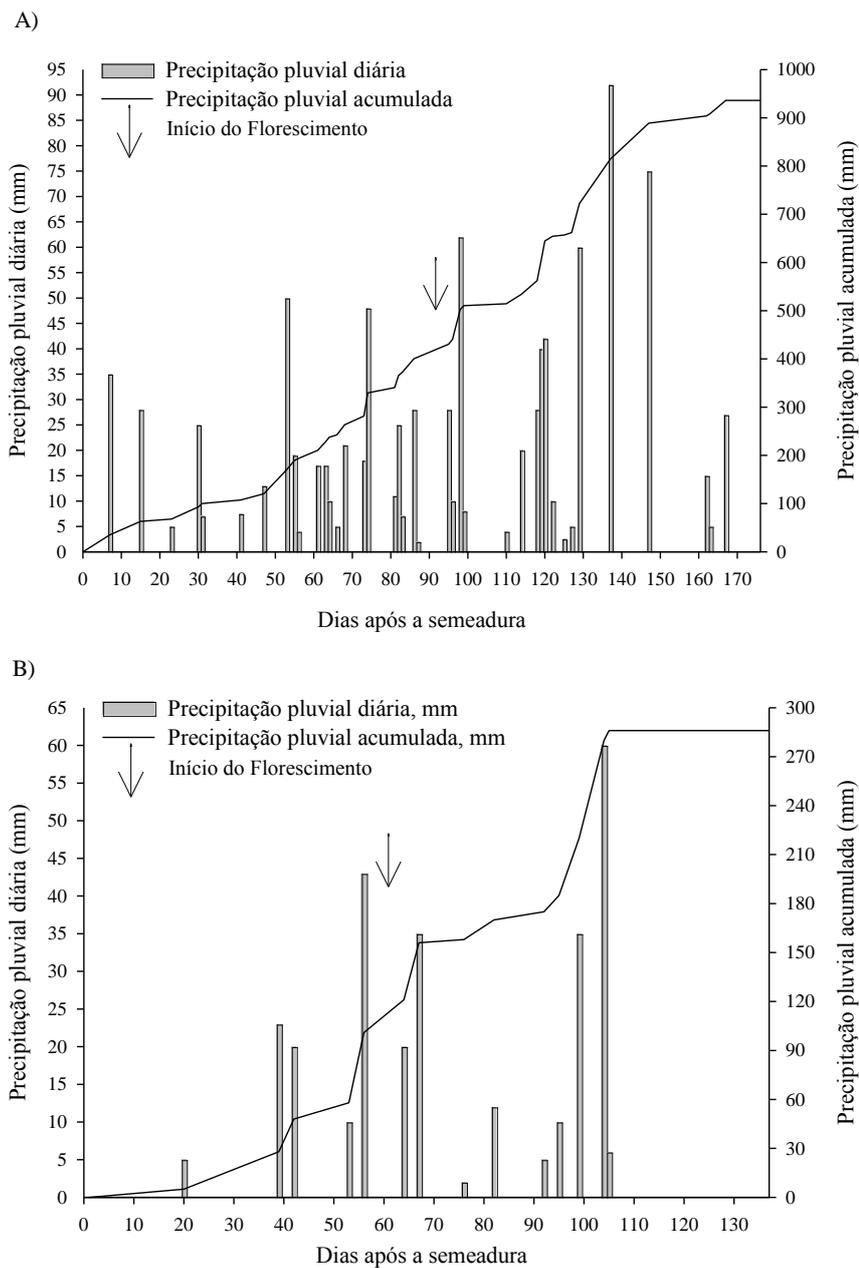
**Figura 3** – Resistência a Penetração (RP) na caracterização inicial antes da instalação do experimento. Com destaque para o valor crítico de RP e classificada de acordo com Arshad et al. (1996). Não Me Toque- RS.

## 4.2 Condições Climáticas

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa subtropical. A temperatura média normal do mês mais quente ocorre em janeiro (24,6°C) e a do mês mais frio em junho (12,9°C). A média normal das máximas é de 30,4°C, em janeiro, e de 19,2°C, em junho. A média das temperaturas mínimas do mês mais quente é de 18,7 °C, em dezembro, e de 9,3 °C a do mês mais frio, em junho. As chuvas são distribuídas regularmente em todos os meses do ano, com precipitação oscilando entre 1.500 mm a 1.750 mm.

Durante o ciclo da cultura do milho, foi observada uma distribuição normal, com eventos extremos atingindo até 90 mm em um único dia (Figura 3A). O volume total acumulado, neste período, atingiu a cerca de 50% do total de chuvas esperada para um ano normal na região. No ciclo agrícola subsequente, na cultura da soja (Figura 3B) a precipitação pluviométrica apresentou um comportamento ligeiramente diferente do que aconteceu na safra do milho, as chuvas foram menos intensas, com maiores intervalos entre os eventos, atingindo no final do ciclo aproximadamente 20% da precipitação normal da região.

A escolha deste local, fazenda Anna, se baseou na disponibilidade de máquinas e equipamentos com sistema de AP embarcados. Além da disponibilidade de acesso ao histórico de manejo na área de pesquisa e utilização de AP de grande relevância. Esta fazenda é pioneira na implantação do ciclo completo de AP, sendo parceira do projeto Aquarius a mais de 13 anos na condução de experimentos ligados a área.



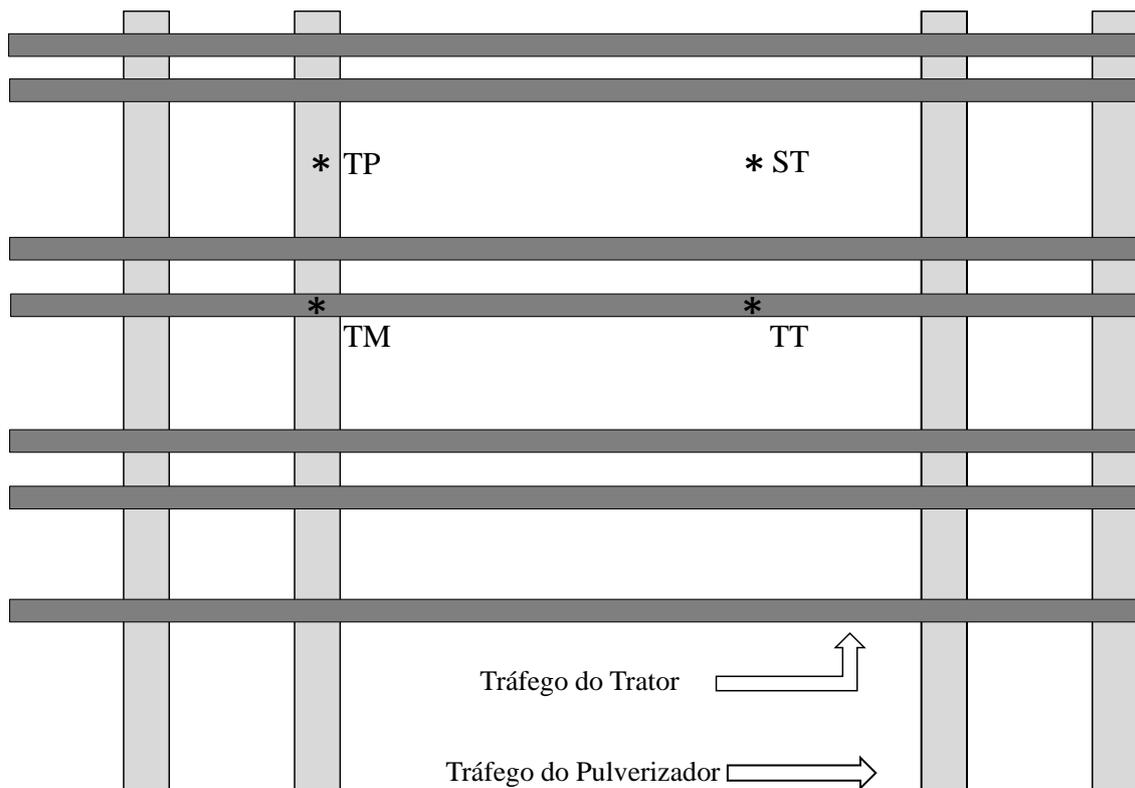
**Figura 4** – Precipitações diárias e acumuladas na fazenda Anna, município de Não Me Toque (RS), durante o ciclo da cultura do milho (A) e da soja (B). Fonte: Fazenda Anna.

### 4.3 Tratamentos

O experimento teve a duração de duas safras agrícolas de verão, sendo a cultura de milho (*Zea mays*) no ano de 2010/2011 e a cultura da soja (*Glycine max*) no ano agrícola 2011/2012 de aveia preta (*Avena strigosa*) como cultura de cobertura durante o inverno entre

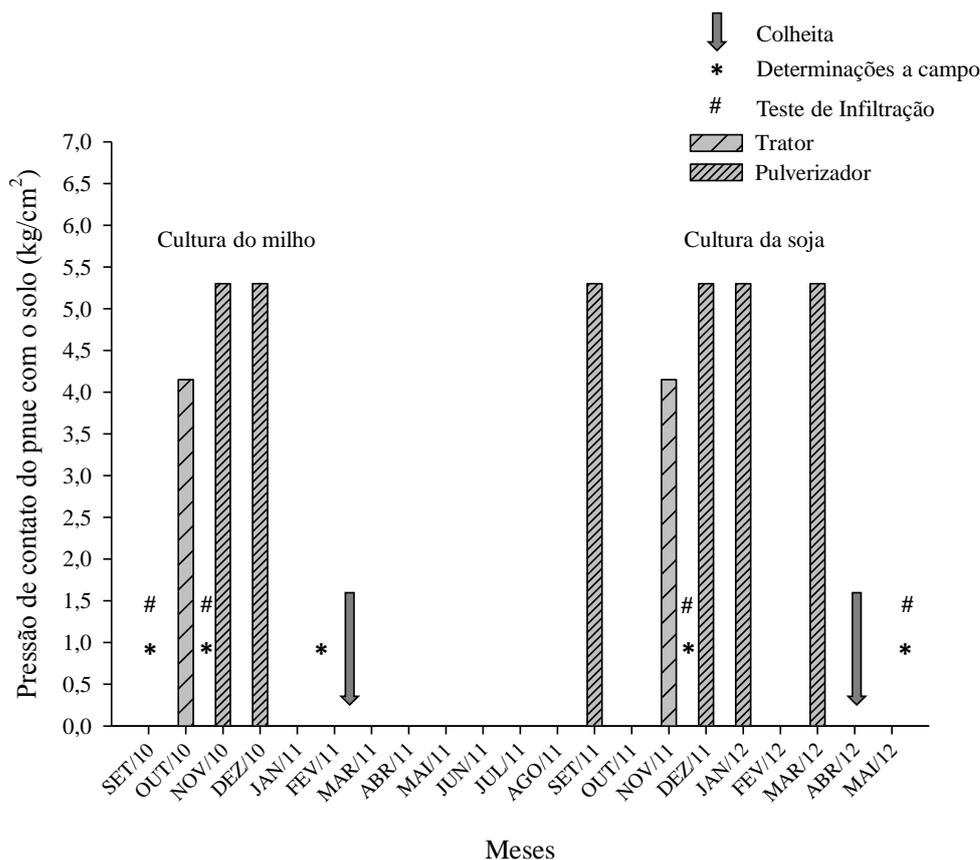
as safras de verão. O manejo fitossanitário seguiu as recomendações oficiais para cada cultura, tratamento de sementes, estratégias de manejo baseadas na AP e conservação do solo.

Os tratamentos investigados foram: (a) Sem tráfego de pneus, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do pulverizador (TP); (c) Tráfego de pneus com o conjunto trator-semeadora (TT); e (d) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do trator (TM). Os tratamentos e os locais das determinações são apresentados de forma esquemática para facilitar o entendimento (Figura 5).



**Figura 5** – Representação simplificada dos tratamentos e dos locais das determinações do experimento a campo durante 2 anos de avaliação. Não Me Toque (RS).

A sequência de aplicações dos tratamentos e as diferentes épocas de determinações no campo, foram realizadas seguindo o manejo realizada pelo produtor, em função da necessidade de entrada de máquinas e equipamentos para as operações em cada cultura (Figura 6).



**Figura 6** – Ordem cronológica das determinações a campo e a intervenções realizadas no experimento. Não Me Toque, RS.

Uma ressalva importante é que esta linha cronológica da entrada das máquinas dentro da área e das diferentes épocas dos trabalhos a campo, não possui uma fidelidade diária na sua representação, mas sim ajuda a entender de forma ampla e global o tempo total de duração deste experimento. A terceira época de amostragem foi realizada após três passadas do pulverizador sendo realizada antes da semeadura da soja. Após a semeadura da soja e o primeiro tráfego do pulverizador, no mês de dezembro, foi realizada novamente as determinações. Por fim após a colheita da soja, novamente foi realizada novamente as determinações a campo.

#### 4.4 Caracterização das Máquinas Agrícolas

O pulverizador empregado foi o modelo autopropelido Gladiador 3000®, equipado com motor com 136 kW (185 cv), com massa de embarque de 7.500 kg, distribuídos 50 e

50% na parte frontal e traseira respectivamente. Os pneus utilizados são 12.4R 36 tanto na parte dianteira como traseira. A área de contato do pneu com o solo é de 705,62 cm<sup>2</sup>. A pressão exercida pelo equipamento no solo é de 5.30 kg/cm<sup>2</sup>. A largura nominal das barras de aplicação utilizadas eram de 27 m e a bitola dos pneus de 3.3 m.

O trator utilizado foi o modelo MF 7370 *Dyna 6*<sup>®</sup> com 125 kW ( 170 cv) a massa total de 10.640 kg, sendo distribuído o peso entre 40 e 60% na parte frontal e traseira respectivamente, os pneus são 20.8R 38 traseiro com área de contato de 1531,42 cm<sup>2</sup> e dianteiro de 18.4R 26 com área de contato de 1026,25 cm<sup>2</sup>. A pressão total exercida pelo trator no solo é de 4.15 kg/cm<sup>2</sup> de solo. Lastros metálicos na parte frontal e nos eixos dianteiro e traseiro com utilização de lastragem líquida de água nos rodados traseiros. Para maior precisão o trator estava equipado com o direcionamento automático *Auto Guide Powered by Topcon*<sup>®</sup>, que possui configurações adaptáveis para a precisão em cada operação, no caso de semeadura a precisão utilizada foi de 0,025 m.

A colheita mecânica foi realizada na área fora do limite do experimento, no restante da área com uma colhedora MF 9790 *Axial*<sup>®</sup>, com potencial nominal de 297 kW (380 cv) massa total 15.270 kg distribuídos 60 e 40% no eixo frontal e no eixo traseiro respectivamente. Os pneus dianteiros duplos do modelo 20.8R 38 e traseiros 18.4R 26. A largura da barra de corte na cultura do milho era de 11 linhas (4,95 m) e na cultura da soja a largura de trabalho era de 9,15 m. A colhedora estava equipada com monitor de produtividade *Fildstar*<sup>®</sup>.

Todas as máquinas envolvidas no experimento foram cedidas pelo produtor proprietário da fazenda Anna, bem como as operações foram realizadas pelos funcionários treinados para a realização de cada operação.

A semeadora utilizada foi do modelo *Victoria Control* com largura de trabalho de 5,5 m com 11 linhas espaçadas em 0,50 m. O peso de embarque é de 6.100 kg com capacidade no reservatório de adubo e sementes de aproximadamente 2.000 kg.



## 5 CAPITULO I

### **Modificações dos atributos físicos do solo submetido à diferentes intensidade de tráfego de máquinas**

#### **Resumo**

A compactação do solo atualmente é um dos principais problemas enfrentados pelos produtores na busca de elevada produtividade em lavouras mecanizadas. Em áreas de plantio direto, uma das maiores causadoras da compactação do solo é o tráfego de máquinas, que atualmente apresentam um aumento no seu tamanho e no peso, que quando associado com a alta umidade do solo, acabam gerando camadas compactadas de forma aleatória dentro da lavoura, que modificam as características físicas do solo, através do aumento da densidade, resistência a penetração e redução na infiltração da água. Para investigar a relação entre o tráfego de máquinas e a compactação do solo instalou-se um experimento na cidade de Não Me Toque, RS em um Latossolo Vermelho com elevado teor de argila (>60%) durante dois anos agrícolas, nos quais foi cultivada a cultura do milho no ano de 2010/11 e da soja no ano 2011/12. A precipitação total na cultura do milho foi de 930 mm e durante o ciclo completo da soja foi de 280 mm. A temperatura média anual é de 19,8 °C. Os tratamentos foram: Sem tráfego de pneus, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do pulverizador (TP); (c) Tráfego de pneus com o conjunto trator-semeadora (TT); e (d) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do conjunto trator-semeadora (TM). O delineamento experimental foi composto por três blocos inteiramente casualizados (60 X 40 m). Os parâmetros avaliados foram densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, infiltração de água no solo e a resistência à penetração. As máquinas utilizadas foram o pulverizador autopropelido *Gladiador 3000*<sup>®</sup> peso de embarque de 7.500 kg. O trator o modelo *MF 7370 Dyna 6*<sup>®</sup> com peso total de 10.640 kg. Os resultados evidenciaram a influência dos tratamentos, especialmente tratamento TM no aumento da densidade nas camadas superficiais. O primeiro passe aumentou em até 86% a densidade do solo, reduziu em 96% a infiltração de água no solo, quando comparada ao tratamento ST. Os demais passes tiveram pouco efeito adicional. A resistência à penetração foi o atributo físico que se mostrou mais sensível ao tráfego das máquinas. Foi verificada uma relação positiva entre o número de passe de máquinas e o aumento da resistência à penetração após o tráfego do trator e após o solo receber os passes do pulverizador.

**Palavra chave:** tráfego controlado, peso de máquinas, infiltração de água no solo, agricultura de precisão.



## 5.1 Introdução

A utilização de máquinas e equipamentos cada vez maiores e mais pesados é uma preocupação recorrente nos sistemas de cultivos atuais (Gasso et al., 2013). Em pouco mais de 30 anos na Europa o peso das máquinas passou de 2,6 para 6,6 toneladas, um aumento de 264% (Høj, 2011). Este aumento no peso é preocupante, pois é justamente o peso associado com alta umidade no solo que é a principal causa da compactação do solo em área sob o sistema de plantio direto (SPD) (Raper, 2006; Keller et al. 2013).

A compactação reduz a aeração do solo, o crescimento das raízes e induz a perda de nitrogênio e a emissão de gases de efeito estufa devido a desnitrificação por processos anaeróbios, reduz a condutividade hidráulica saturada ocasionando o escoamento superficial, erosão do solo e redução da disponibilidade de água para as plantas (Sadras et al. 2005, Keller et al. 2013), reduzindo, conseqüentemente, a produtividade da cultura (Nevens e Reheul, 2003, Chan et al, 2006).

Para Botta et al. (2002) independente do estado mecânico do solo onde ocorre o tráfego, quanto mais pesado for o equipamento, maior é a força necessária para a autopropulsão gerando assim o aumento da compactação do solo, considerando por isto a intensidade de trânsito de máquinas dentro da lavoura como um fator causador da compactação (Chamen et al., 2003).

Quando o sistema de tráfego aleatório dentro da área é associado com a falta de cuidados nas condições do solo, especialmente o teor de água no momento de tráfego acaba por formar camadas compactadas de forma descontínua (Botta et al., 2012), causando perdas de produtividade que muitas vezes não são identificadas, especialmente nas culturas de grãos (Tullber et al., 2007). Atualmente, existem diferentes formas de se buscar solucionar o problema da compactação do solo, a mais conhecida é fazer o uso de escarificadores ou até mesmo subsoladores, porém esta operação apresenta elevado custo financeiro, energético e ambiental, não devendo ser realizada de maneira corriqueira ou até mesmo evitada (Soane & Van Ouwerkerk, 1994).

Uma alternativa viável é a prevenção da compactação do solo, através do sistema de tráfego controlado que é fundamentado no isolamento das áreas aonde ocorrer o tráfego de máquinas, daquelas áreas que ficam livres de qualquer tipo de pressão oriunda das máquinas durante as operações agrícolas (Tullberg et al., 2007).

No Brasil este tipo de estudo sobre tráfego controlado ainda é incipiente, principalmente nas áreas do sul do país, onde existe a predominância das culturas de grãos sob SPD. Neste sentido, Gassen (2010) afirma que a utilização do sistema de tráfego controlado é uma alternativa para melhorar a eficiência e a qualidade do SPD. Para Trein et al., (2009) o sistema de tráfego controlado é uma alternativa mais sensata para tentar minimizar os efeitos causados pelas máquinas agrícolas dentro da área. Segundo os mesmo autores durante uma safra agrícola conduzida sob SPD a área é trafegada no mínimo em 50%, utilizando tratores com rodados simples. Quando se utiliza máquinas com rodados duplos esta área pode subir para mais de 70% (Alba et al., 2011).

Pelo exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da intensidade do tráfego controlado de máquinas agrícolas em uma lavoura comercial, nos atributos físicos do solo, infiltração de água e resistência à penetração durante duas safras agrícolas.

## 5.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido no município de Não-Me-Toque – RS, pertencente à Fazenda Anna e integrante do projeto Aquarius ([www.ufsm.br/projetoaquarius](http://www.ufsm.br/projetoaquarius)) durante duas safras de verão, sendo a cultura de milho (*Zea mays*) semeada no ano de 2010/2011 e a cultura da soja (*Glycine Max*) no ano de 2011/2012. O híbrido utilizado foi o 30F53 com 4,5 plantas por metro linear. A cultivar de soja utilizada foi a ATIVA BMX, com 14 sementes por metro linear.

No período de inverno a área foi mantida com cobertura vegetal formada pela aveia preta (*Avena striugosa*). Os tratamentos investigados foram: (a) Sem tráfego de pneus, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do pulverizador (TP); (c) Tráfego de pneus com o conjunto trator-semeadora (TT); e (d) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do trator (TM).

Os atributos físicos (densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) foram investigados em todos os tratamentos nas seguintes camadas: 00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m com nove repetições espaçadas regularmente a cada 20 m dentro de cada tratamento. Abrindo-se pequenas trincheiras, a fim de que os anéis com volume conhecido (0,03 m de altura e 0,05 m de diâmetro) fosse introduzidos no solo e, posteriormente, levados ao laboratório aonde foram feitas as determinações, seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

Para determinação da infiltração de água no solo utilizou-se a metodologia do duplo anel concêntrico proposta por Embrapa (1997), as leituras foram tomadas nos seguintes intervalos de tempo: 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 min após o início do teste. Para um resultado mais preciso e com menor variabilidade optou-se por utilizar dez repetições em cada tratamento.

Para a determinação da resistência do solo a penetração (RP) o equipamento que foi utilizado foi o Penetrômetro Geo-Referenciado PNT-2000 de operação manual. Os valores de RP foram observados e registrados a cada 0,01 m de profundidade até uma profundidade máxima de 0,40 m. Em virtude da elevada variações deste parâmetro foram feitas 10 repetições em cada tratamento, concomitantemente foi determinado a umidade do solo na mesma camada avaliada.

O delineamento experimental seguiu o modelo de blocos inteiramente casualizados (60 X 40 m), totalizando uma área experimental de 7.200 m<sup>2</sup>. Os dados foram submetidos à análise de variância, com uso do programa computacional ASSISTAT 7.6 beta (Silva & Azevedo, 2009) sendo as médias comparadas entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

## **5.3 Resultados e Discussão**

### 5.3.1 Florescimento do Milho 2011

Comparando os resultados obtidos para a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, entre os tratamentos após a colheita da cultura do milho não se observou diferença estatística entre os tratamentos, com aumento na densidade do solo de 20,5; 17,3 e 9,5% respectivamente nos TM, TP e TT em relação ao ST (tratamento referência) na camada superficial até 0,05m de profundidade. Na camada 0,05-0,10m ocorreu aumento relativamente menor da densidade do solo 13,4; 12,0 e 7,4% respectivamente nos TP, TM e TT em relação ao ST (Quadro 3).

**Quadro 2** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), no momento do pleno florescimento do milho no ano de 2011 em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS

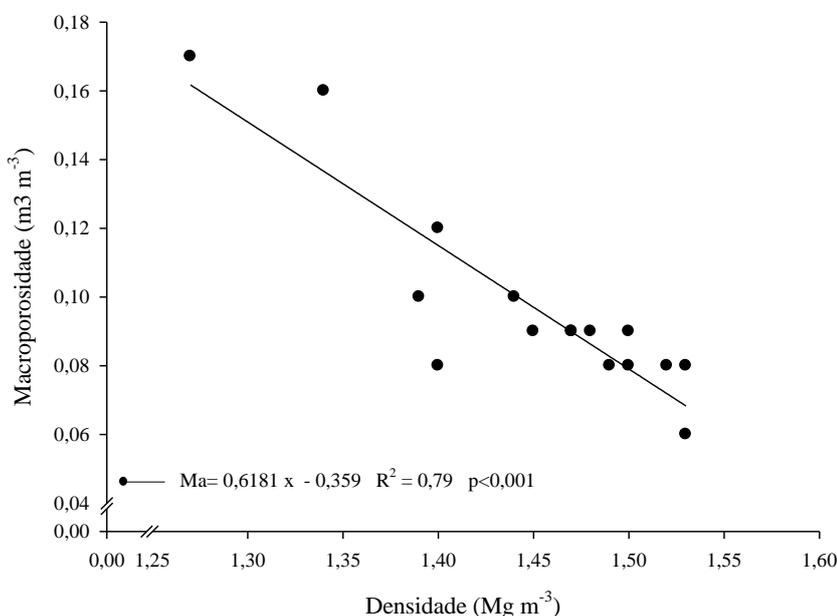
Tratamentos	Ds	Ma	Mi	Pt
	Mg m <sup>-3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
		0,0 – 0,05 m		
ST	1,27 b	0,17 a	0,31 b	0,48
TP	1,49 a	0,08 b	0,42 a	0,50
TT	1,39 ab	0,10 b	0,42 a	0,52
TM	1,53 a	0,06 b	0,40 a	0,46
Teste F	4,42*	5,68**	11,22**	3,19 <sup>ns</sup>
CV (%)	10,85	35,38	21,94	11,82
		0,05 – 0,10 m		
ST	1,34 b	0,16 a	0,41	0,57 a
TP	1,52 a	0,08 b	0,42	0,50 b
TT	1,44 ab	0,10 b	0,38	0,48 b
TM	1,50 ab	0,09 b	0,39	0,48 b
Teste F	3,63*	7,86**	3,08 <sup>ns</sup>	15,07**
CV (%)	8,91	32,25	6,96	6,01
		0,10 – 0,20 m		
ST	1,40	0,12 a	0,43	0,55 a
TP	1,47	0,09 ab	0,38	0,47 b
TT	1,48	0,09 ab	0,39	0,48 b
TM	1,50	0,08 b	0,39	0,47 b
Teste F	1,45 <sup>ns</sup>	4,20*	3,14 <sup>ns</sup>	5,94**
CV (%)	7,20	26,57	9,05	7,54
		0,20 – 0,30 m		
ST	1,45	0,09	0,42	0,51
TP	1,40	0,08	0,42	0,50
TT	1,47	0,09	0,39	0,48
TM	1,53	0,08	0,39	0,47
Teste F	2,10 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	1,53 <sup>ns</sup>
CV (%)	7,46	19,38	14,03	7,20

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TP= área com tráfego do pulverizador autopropelido, TT= área com tráfego de pneus do trator, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido mais área com tráfego de pneus do trator. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna e profundidade, diferem pelo teste de Duncan. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

Em relação aos valores de macroporosidade (Ma), observou-se o comportamento esperado, que é diminuição da Ma quando ocorre o aumento da Ds, esta redução foi de 72,0, 63,6 e 54,5% respectivamente para o TM, TP e TT em relação ao ST. Na camada de 0,05-0,10 m a redução foi de 50,0, 44,0 e 37,4% respectivamente TP, TM e TT quando comparado com o tratamento referencia ST. O aumento da Ds corresponde a menor aeração do solo que neste caso ficou abaixo do limite considerado como limitante ao desenvolvimento da cultura que é de 10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (Reichert & Reinert, 2003). Nas demais profundidades não se observou

diferença estatística entre os tratamentos, o que corrobora com o resultado encontrado (Tormena et al., 1998; Alves & Suzuky, 2004) que observou que a compactação em SPD ocorre nas camadas mais superficiais do solo. A umidade do solo no momento da determinação era de  $0,24 \text{ g g}^{-1}$ .

A correlação entre a Ma e a Ds foi determinada utilizando todos os resultados obtidos nos tratamentos nesta época e em todas as camadas avaliadas, (Figura 7). Este resultado evidencia que as alterações ocasionadas pelo tráfego de máquinas na densidade do solo reduzem a macroporosidade, sendo que o aumento da densidade foi responsável em aproximadamente 80% ( $R^2 = 0,79$ ;  $p < 0,01$ ) pela redução da macroporosidade. Esta redução vai ter influência negativa no desenvolvimento das culturas, e afetando negativamente a produtividade.



**Figura 7** – Relação entre densidade do solo e macroporosidade de um Latossolo Vermelho distrófico, com diferentes intensidades de tráfego de máquinas ( $n = 16$ ). Não Me Toque – RS.

Através da relação existente entre os parâmetros, é possível estabelecer que a densidade crítica para que se mantenha os valores de macroporosidade de  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  proposto por Reichert & Reinert (2003) é de  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ . O aumento da densidade neste tipo de solo pode ocasionar reduções significativas no desenvolvimento das culturas, refletindo na redução da produtividade.

## 5.3.2 Após a colheita da Soja 2012

Logo após a colheita da cultura da soja com duas passadas acumuladas de trator e seis passadas de pulverizador, os valores para as propriedades físicas não apresentaram grandes variações em seus valores, e somente na camada superficial é que se encontrou diferença estatística entre os tratamentos para o parâmetro Ds (Quadro 3).

**Quadro 3** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), após a colheita da soja no ano de 2012 em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS.

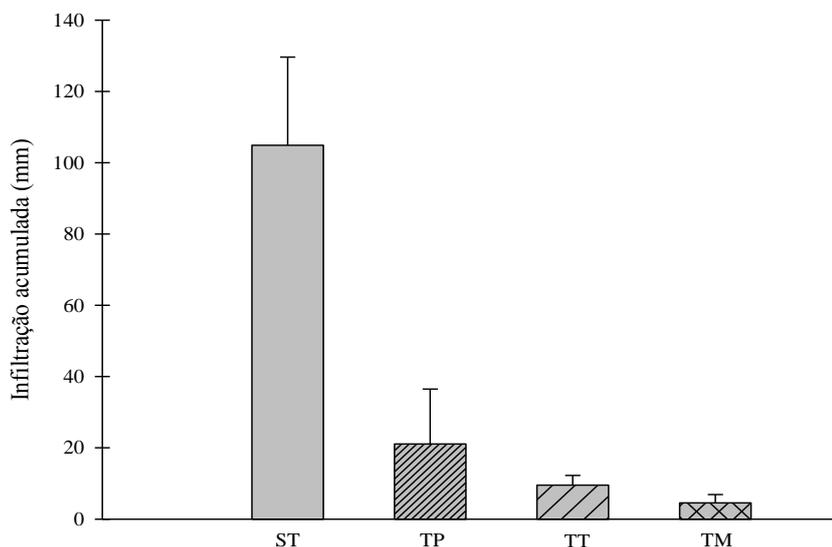
Tratamentos	Ds	Ma	Mi	Pt
	Mg m <sup>-3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
0,0 – 0,05 m				
ST	1,31 b <sup>(1)</sup>	0,13	0,37	0,50
TP	1,38 a	0,14	0,38	0,52
TT	1,40 a	0,15	0,43	0,58
TM	1,44 a	0,14	0,43	0,57
Teste F	1,57*	0,55 <sup>ns</sup>	3,01 <sup>ns</sup>	1,37 <sup>ns</sup>
CV (%)	16,59	26,43	14,38	10,43
0,05 – 0,10 m				
ST	1,40	0,11	0,39	0,50
TP	1,54	0,13	0,39	0,52
TT	1,42	0,14	0,38	0,52
TM	1,40	0,13	0,38	0,51
Teste F	0,97 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>
CV (%)	12,78	28,04	11,66	6,78
0,10 – 0,20 m				
ST	1,44	0,11	0,41 a	0,51 a
TP	1,40	0,09	0,36 b	0,46 b
TT	1,42	0,10	0,37 b	0,48 ab
TM	1,46	0,10	0,37 b	0,48 ab
Teste F	0,80 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	2,27 <sup>ns</sup>	2,82 <sup>ns</sup>
CV (%)	5,24	19,04	7,81	6,63
0,20 – 0,30 m				
ST	1,40	0,10	0,42 a	0,52 ab
TP	1,45	0,09	0,38 ab	0,47 b
TT	1,41	0,11	0,36 b	0,47 b
TM	1,48	0,10	0,49 ab	0,59 a
Teste F	1,38 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	1,77*	2,72*
CV (%)	4,57	30,44	11,92	5,80

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TP= área com tráfego do pulverizador autopropelido com seis (6) passadas acumuladas, TT= área com tráfego de pneus do trator, com duas (2) passadas de trator acumuladas, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido com seis (6) passadas mais área com tráfego de pneus do trator, com duas (2) passadas. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna e profundidade, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

O tratamento TM apresentou um aumento de 9% em relação ao tratamento ST, os demais tratamentos não apresentam diferença entre si. Este fato pode ser explicado pela presença ativa do sistema radicular, que atua de forma a aliviar o compactação do solo, através da criação de poros biológicos (Reinert et al., 2008) e a presença de cobertura vegetal na superfície do solo, que atua como um dissipador do peso e a pressão das máquinas no solo (Soane, 1990). No momento da coleta de solo e determinação, o solo encontrava-se com umidade de  $0,22 \text{ g g}^{-1}$ .

### 5.3.3 Infiltração de água no solo

Após um passe de trator e um passe de pulverizador, observou-se uma grande diferença entre os tratamentos avaliados, sendo que no tratamento ST os valores superaram os 100 mm de água infiltrada (Figura 8).



**Figura 8** – Infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a semeadura do milho, novembro de 2010.

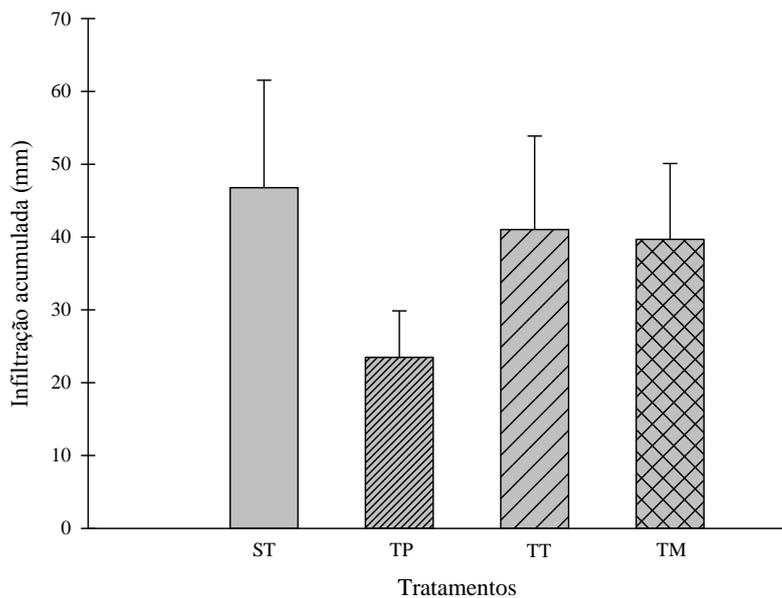
No tratamento TM foi o que se observou a menor infiltração, ao final dos 120 minutos de avaliação apenas uma lâmina de 4,5 mm de água foi infiltrada. Esta diferença representa 95,6% a mais de água que infiltrou no solo. No tratamento TT a diferença também foi muito grande 91% a menos de água infiltrada no solo. O tratamento TP apresentou um

pouco a mais de infiltração que os anteriores sendo 80% a menos que o ST. Embora não tenha sido encontrada diferença entre estes tratamentos.

A acentuada redução na infiltração ocorreu devido a alteração nos atributos físicos causada no primeiro trânsito das máquinas, corroborando com Cunha (2009) que observou em um Latossolo Vermelho Distroférico que a primeira passada foi a que mais provocou a compactação do solo, tendo em vista que o efeito das passadas subsequentes foi pequeno. Outro fator determinante para redução da infiltração água no solo é apresentado no quadro 3 que demonstra que o tratamento ST apresenta menor Ds e maior Ma e Pt nas camadas superficiais do solo (até 0,10m), sendo que no demais tratamentos o valor de Ma esta abaixo do considerado como crítico. Nas demais profundidades o tratamento apresenta Ds um pouco maior e igual Ma e Pt que os demais tratamentos, mas não foram suficientes para reduzir a infiltração.

A macroporosidade é a responsável diretamente pela infiltração e a drenagem de água no solo (Hillel, 1998). Com a modificação na estrutura causada pela compactação, a infiltração e a distribuição de água podem resultar em problemas no estabelecimento e crescimento das raízes, prejudicando de forma direta o rendimento das culturas. (Flowers & Lal, 1998; Imhoff, 2002). A umidade do solo no momento dos testes de infiltração era de 20,4%

Uma nova determinação de infiltração de água no solo foi realizada 23 dias após a semeadura da soja, onde se observa que mesmo com o acúmulo de trânsito de máquinas durante a safra, tendo duas passadas de trator e seis de pulverizador as diferenças foram pequenas entre os tratamentos, sendo que o ST apresentou o maior volume infiltrado, de 46 mm após duas horas de avaliação (Figura 9).

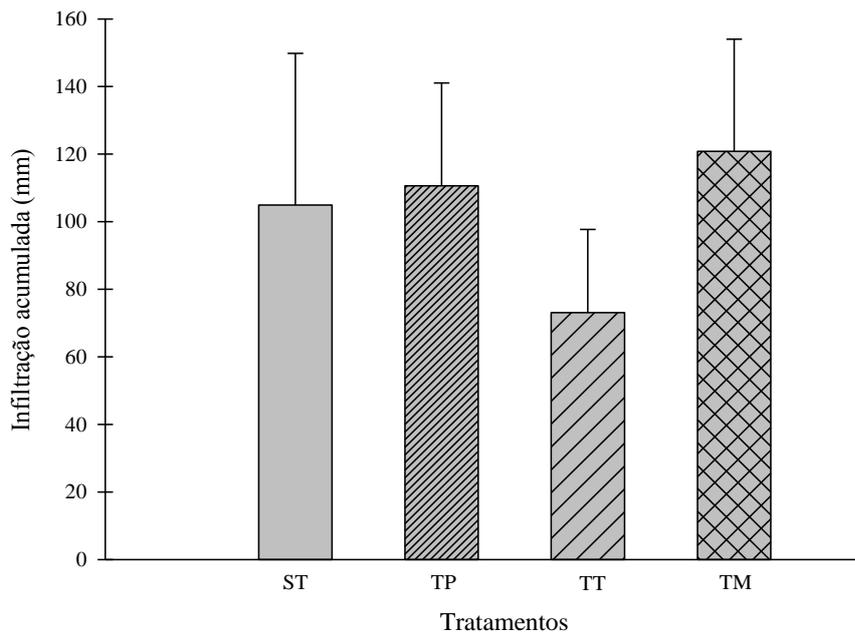


**Figura 9** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a semeadura da soja, novembro de 2010.

A redução da infiltração foi não significativa entre os tratamentos, ocorrendo redução na ordem de 50, 12 e 15% nos tratamentos TP, TT e TM respectivamente, quando comparadas os tratamento ST. Mesmo não apresentando diferença estatística significativa, a tendência na redução da infiltração é observada em todos os tratamentos.

Em relação às determinações realizadas na época após a semeadura do milho (Figura 8) ocorreu uma redução significativa na infiltração de água no solo. No tratamento ST, a redução foi de 55,4%, nos demais tratamentos, ao contrário, ocorreu um aumento da infiltração de água no solo motivado possivelmente pela grande presença de raízes, uma vez que entre uma avaliação e outra a produção de milho e aveia como forma de cobertura do solo proporcionaram uma grande produção do sistema radicular, com isso favorecendo a aumento da infiltração, uma vez que os bioporos formados pelas raízes possuem uma estabilidade maior, favorecendo assim o aumento da infiltração de água no solo. No momento dos testes de infiltração o solo encontrava-se com a umidade 24,3%.

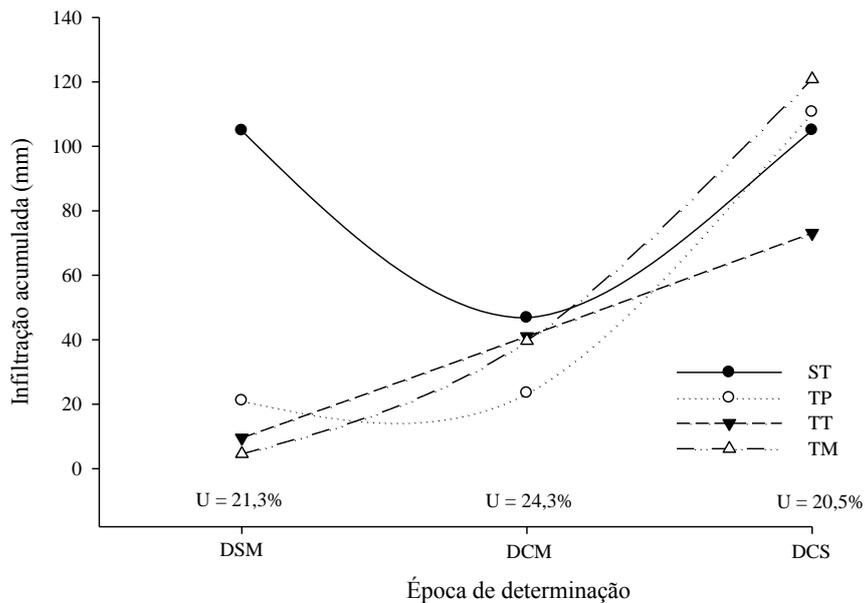
Após a realização da colheita da soja foi realizada novamente os testes de infiltração da água no solo e a infiltração no tratamento ST foi de 115 mm, porém não diferenciando dos tratamentos TP e TM que tiveram praticamente a mesma infiltração ao final do tempo avaliado, ficando em torno de 110 mm (Figura 10).



**Figura 10** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes tratamentos, após a colheita da soja, abril de 2012.

O tratamento que teve a menor infiltração de água foi o TT, com uma infiltração de 73 mm, praticamente durante todo o período de experimento em que foram feitas as avaliações de infiltração o tratamento apresentou diferença estatística para os demais, Este resultado aconteceu devido a forte influência da época da avaliação na infiltração. Neste período de avaliação o acúmulo das cargas sobre cada tratamento era de duas passadas de trator e quatro de pulverizador e a umidade do solo era de 22,3%.

De uma forma geral, os testes de infiltração apresentaram uma variação bastante grande durante os dois anos de avaliação (Figura 11). Uma vez que existem muitos parâmetros físicos do solo envolvidos, sendo o principal a umidade do solo no momento da realização dos testes, grande quantidade de raízes, formação de bioporos através da mesofauna, desagregação causada no momento da instalação dos anéis concêntricos no solo entre outros, portanto devemos considerar estes resultados com cuidado. De maneira geral pode-se observar que a infiltração de água foi reduzida em todos os tratamentos quando o solo se encontrava com maior umidade.



**Figura 11** – Taxa de infiltração acumulada de água no solo, após 120 minutos de avaliação, em diferentes épocas de determinação e tratamentos. Não Me Toque, (RS). Onde: DSM = depois da semeadura do milho, DCM = depois da colheita do milho e DCS = depois da colheita da soja.

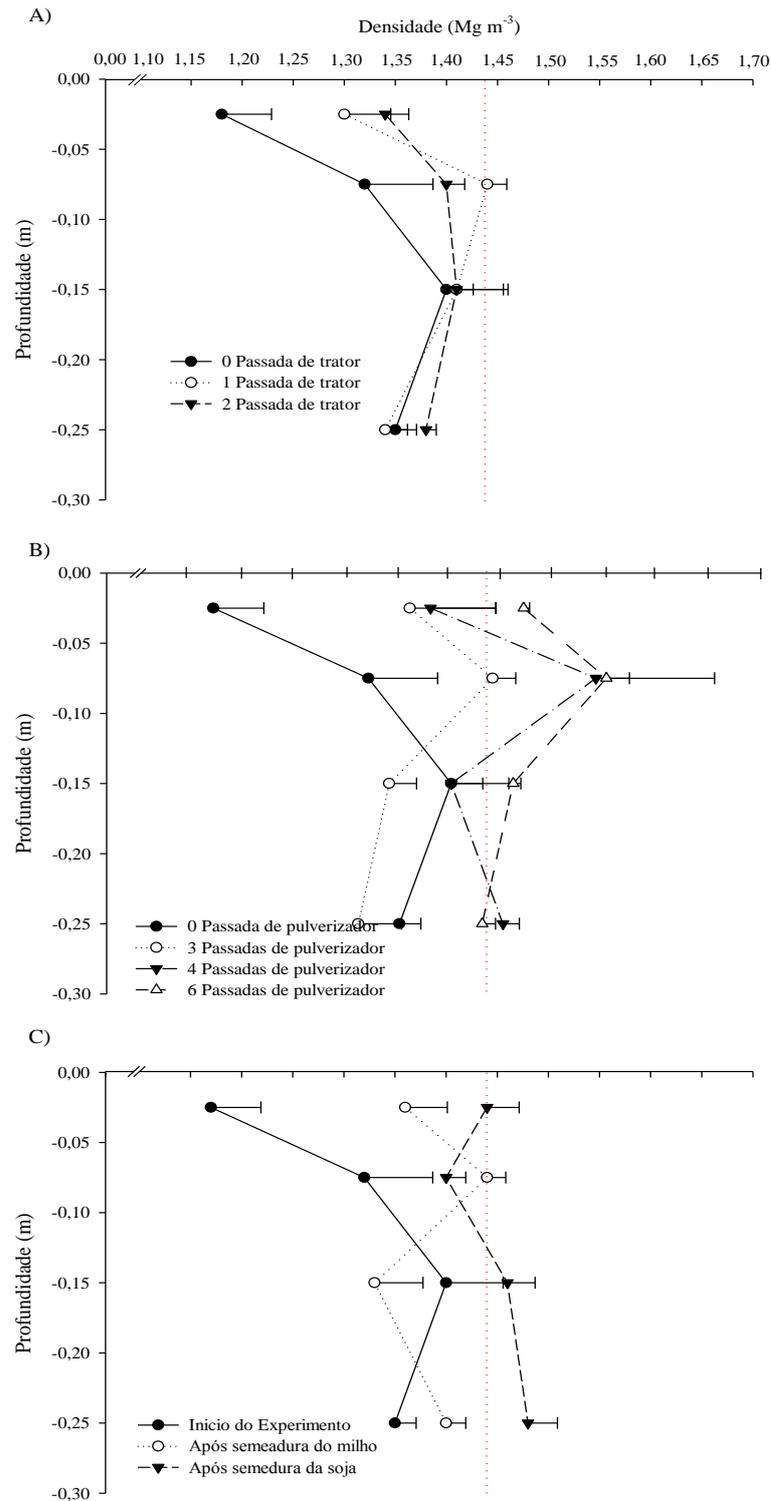
Todavia ficam evidentes as diferenças causadas pelo trânsito de máquinas dentro da área na infiltração de água, principalmente quando as determinações são realizadas logo após o tráfego das máquinas. Em um contexto geral, pode-se concluir que a ocorrência de precipitações pluviométricas logo após o tráfego das máquinas é potencialmente causadora de maior perda de água por enxurrada.

#### 5.3.4 Variação da densidade e macroporosidade em função do tráfego

Durante os dois anos de experimento a campo foi possível identificar uma variação temporal nas propriedades físicas do solo para facilitar o entendimento será apresentado os resultados por propriedades separadamente.

##### 5.3.4.1 Densidade

O tráfego do trator é inevitável que ocorra dentro da área, pois ele é realizado no momento da semeadura, sendo que a variação temporal da  $D_s$  foi afetada pelo número de passadas, principalmente nas duas camadas mais superficiais (Figura 12 A).



**Figura 12** – Variação da densidade do solo ( $D_s$ ) após diferentes intensidades de tráfego do trator (A), do pulverizador (B) e do tráfego máximo (C). Com destaque para o valor crítico de  $D_s$  obtido em função da macroporosidade limitante proposta por Reinert et al. (2001). Não Me Toque- RS. Onde: Início do experimento = ausência de tráfego, após semeadura do milho = 1 passada de trator+ 1 passada de pulverizador, após semeadura da soja = 2 passadas de trator + 6 passadas de pulverizador. Não Me Toque- RS.

O aumento da Ds na camada de 00-0,05 m foi de 13,6% quando se passou duas vezes o rodado do trator, todavia após a primeira passada, o aumento representou 10%, evidenciando que o primeiro tráfego na área representou mais de 77% de aumento da total da Ds. Resultado semelhante ao encontrado por Pytka (2005) quando investigando o mecanismo da compactação após o tráfego de máquinas em solos siltosos.

Na camada de solo situada entre 0,05-0,10 m o comportamento foi semelhante, porém sem a mesma magnitude, com um aumento de 9%. Nas camadas mais profundas não ocorreu diferença entre o número de passadas e o aumento da Ds. A ocorrência da compactação na camada superficial (até 0,10 m) foi observado por Freddi et al. (2007) em um Latossolo Vermelho quando o sistema de cultivo foi o de semeadura direta. Este aumento da Ds após o tráfego de máquinas acaba por rearranjar as partículas do solo, dificultando o desenvolvimento e crescimento das raízes, causando perdas de produtividade nas culturas (Farias et al., 2013).

O tráfego do pulverizador um acúmulo de passagem do pulverizador autopropelido durante os dois anos de cultivo (Figura 12 B). A Ds do solo apresentou um aumento de 16,2; 17,9 e 25,6% nos locais onde o pulverizador passou três, quatro e seis vezes respectivamente, na camada superficial (00-0,05). Relativizando o aumento de Ds o primeiro trânsito do pulverizador autopropelido foi o responsável pelo aumento de 86% da densidade do solo. Neste caso, no tratamento TP é possível observar que o aumento do número de passadas, foi acompanhado pelo aumento dos valores de Ds.

Nas camadas mais profundas observa-se que mesmo sendo pequena a diferença a Ds ainda continua seguindo o mesmo comportamento, de aumentar na medida em que aumenta o número de passadas. Outra observação possível de ser feita é que as primeiras passadas do equipamento é que ocasionaram as maiores modificações nas propriedades físicas do solo, semelhante ao o que acontece quando se utiliza o trator.

Nas operações que fazem o uso de pulverizador autopropelido as condições climáticas tais como, vento, umidade do ar, são observadas para a realização das operações, pois as mesmas são fundamentais para o funcionamento pleno dos produtos aplicados pelo pulverizador. Já condição solo como umidade, trafegabilidade muitas vezes são negligenciadas no momento das operações, sendo que o tráfego muitas vezes ocorre com elevada umidade, contribuindo assim para que ocorra a compactação do solo em locais que sofreram a pressão de pneus (Flowers & Lal, 1998).

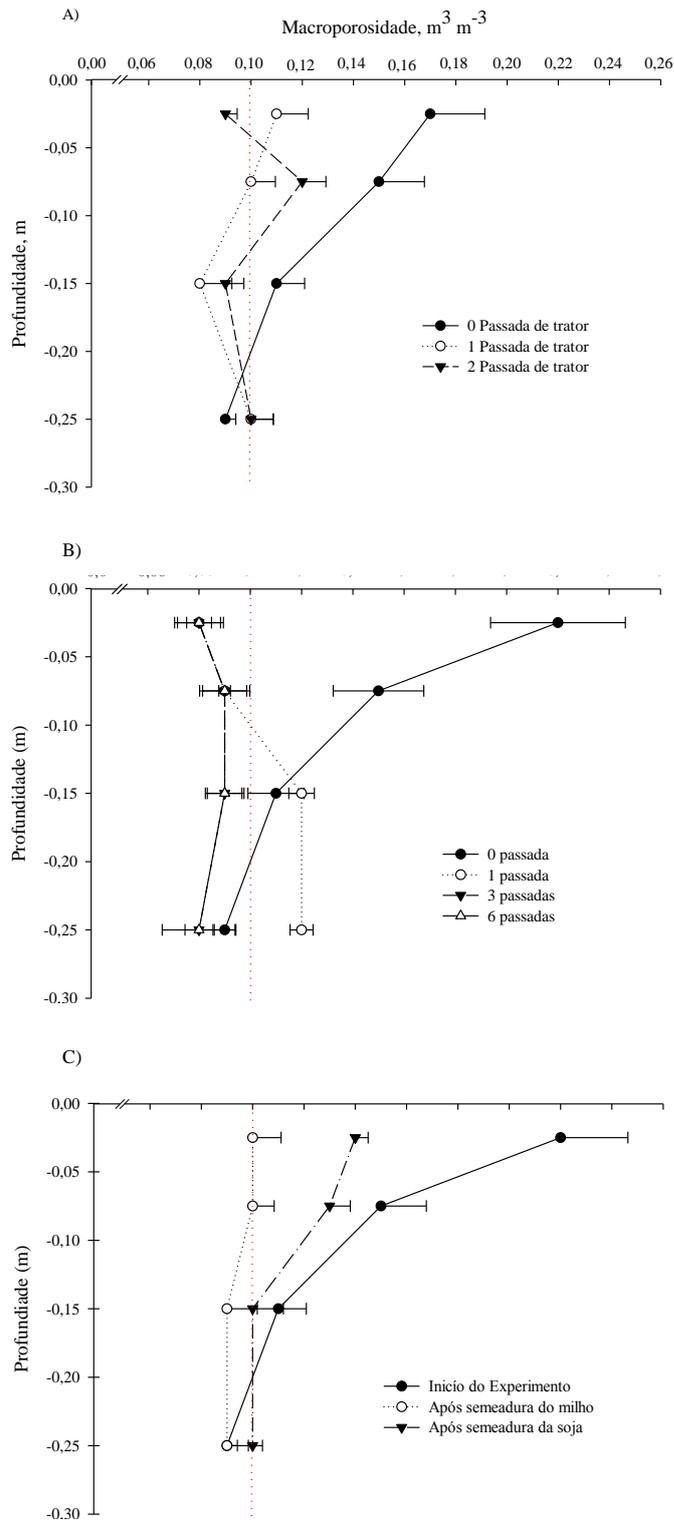
No tratamento TM optou-se por avaliar o tráfego máximo em três diferentes épocas, antes da instalação do experimento, após a semeadura do milho e da soja (Figura 12 C), onde

foi observado aumento de 16,2 e 23,0%, respectivamente, onde ocorreu uma passada de trator, e uma do pulverizador e onde o trator passou duas vezes e o pulverizador seis. Este aumento representou 86% de aumento em relação à primeira passada. A semelhança do observado neste estudo, Fenner (1999) fazendo um estudo de tráfego controlado em solos da Amazônia, verificou que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subsequentes mais reduzidos.

Após a semeadura da soja, foi o momento em que ocorreu a maior quantidade de tráfego, e o que apresentou os maiores valores de Ds quando comparada com as demais épocas de avaliações. Este aumento também é observado, nas maiores profundidades estudadas, gerando com isso a preocupação que o excesso de tráfego na área pode causar problemas de compactação do solo em subsuperfície, o que torna a correção deste problema bastante oneroso e de difícil correção pelo produtor. A redução observada na camada até 0,20 m após a semeadura do milho acredita-se, que seja um efeito residual do sistema radicular agressivo da aveia, cultura de cobertura antecessora da cultura do milho, atuando como um descompactador natural do solo (Nicoloso et al., 2008).

#### *5.3.4.2 Macroporosidade*

Após o tráfego do trator foi possível observar que a primeira passada do trator ocasionou uma redução de 41% nos macroporos, ligeiramente abaixo do limite crítico ( $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) proposto por Reinert et al. (2001) para que se tenha uma infiltração de água no solo e o suprimento de oxigênio para as raízes de forma eficiente (Figura 13 A). Nas camadas mais profundas o comportamento entre o número de passadas do trator é muito semelhante, sendo que após a camada de 0,15 m a tendência é a mesma, onde não ocorreu o tráfego do trator os valores são ligeiramente maiores dos locais aonde existiu este tráfego.



**Figura 13** – Variação da macroporosidade solo ( $M_a$ ) após diferentes intensidades de tráfego do trator (A), do pulverizador (B) e do tráfego máximo (C). Com destaque para o valor crítico proposto por Reinert et al. (2001). Não Me Toque- RS. Onde: Início do experimento = ausência de tráfego, após sementeira do milho = 1 passada de trator+ 1 passada de pulverizador, após sementeira da soja = 2 passadas de trator + 6 passadas de pulverizador. Não Me Toque- RS.

A compactação do solo altera a distribuição do tamanho de poros, reduzindo os poros grandes (macroporos), que são os responsáveis pela infiltração, rápida distribuição e aeração do solo, e incrementando os poros com menor diâmetro (microporos), que tem a função na retenção e armazenamento de água no solo. Esta mudança acaba por diminuir a infiltração de água, aumentando assim as chances de acontecer as perdas por escoamento superficial (Hillel, 1982). Outra preocupação com esta mudança na porosidade diz respeito à redução na continuidade dos poros, que acaba afetando as trocas gasosas, difusão de gases dentro do solo (Novak et al., 1992).

No tratamento com tráfego do pulverizador, a macroporosidade apresentou uma redução de 63,6% em relação ao local onde não ocorreu nem uma passada do pulverizador (ST) e onde o equipamento passou uma, três e seis vezes (Figura 13 B). Mais uma vez evidenciando que a primeira passada é a que causa os maiores problemas na estrutura do solo, corroborando com Cunha (2009), que em um Latossolo Vermelho estudando diferentes tipos de preparo de solo, concluiu que a primeira passada foi a que mais provocou a compactação do solo, tendo em vista que o efeito das passadas subsequente foi pequeno. Na camada até 0,10 m de profundidade as diferenças estatísticas continuam acontecendo entre o tratamento ST e os demais tratamentos que são iguais estatisticamente.

Na camada que se localiza entre os 0,10 e 0,20 m os tratamentos não apresentam diferença estatística entre si, com exceção da camada mais profunda, com uma passada. As reduções mais significativas aconteceram na camada superficial (00-0,05 m) e na camada até 0,10 m de profundidade, que foram 64 e 46% respectivamente em relação a área livre de tráfego comparada com diferentes numero de passadas. Neste sentido o uso de plantas de cobertura, com sistema radicular agressivo, é uma alternativa viável para tentar solucionar a compactação causada pelo tráfego do pulverizador. Outra alternativa, é fazer o uso de hastes sulcadoras para deposição de adubo (botinhas ou facão), que possuem a capacidade de romper esta camada compactada, embora sua operação demande força, potência e maior consumo por parte dos tratores responsáveis pela tração (Daniel et al., 2000).

No tratamento TM, a macroporosidade do solo foi afetada de pela intensidade de tráfego (Figura 13 C). Ao final das avaliações os observou-se uma redução os macroporos de 55%, redução que deixa a Ma no limite crítico para o desenvolvimento satisfatório das raízes que é de  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Tormena et al., 1998; Reinert et al., 2001).

Novamente a maior redução neste parâmetro ocorreu após a primeira passada confirmando o que reportaram Jakobsen & Greacen, (1985) que sustentaram que a medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação, seguindo uma escala logarítmica.

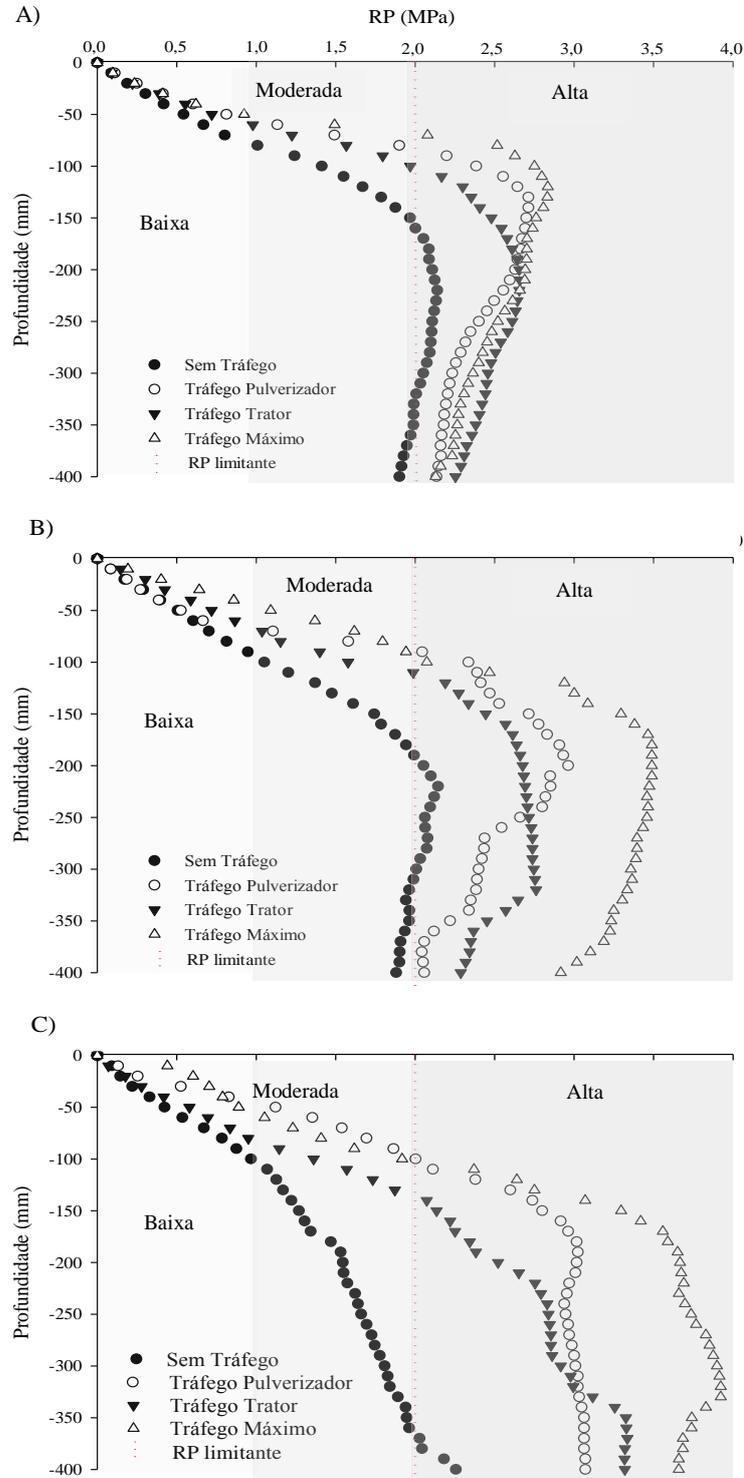
Uma observação possível de ser feita, é a redução dos valores na camada abaixo de 0,15 m para muito próximo ao limite crítico para o desenvolvimento das culturas de sequeiro, sendo esta uma preocupação recorrente, uma vez que camadas compactadas no subsolo apresentam maiores dificuldades e elevado custo energético para a sua solução Hakansson & Reeder (1994).

### 5.3.5 Resistência do Solo à Penetração (RP)

Após a semeadura do milho no ano de 2010 as determinações foram realizadas e em relação à determinação realizada na caracterização inicial (Figura 3) observa-se que o tratamento testemunha (ST) não apresentou valores considerados restritivos para o desenvolvimento das culturas. Ao contrário, onde ocorreu o tráfego de máquinas os valores foram 32,1; 35,3 e 41,5% maiores que o limitante para os tratamentos e nas profundidades de 0,21, 0,13 e 0,12 m TT, TP e TM respectivamente, que pela classificação proposta por Arshad et al. (1996) são considerada como RP alta (Figura 14 A). Este aumento está relacionado com a aplicação dos tratamentos, sendo que o tratamento TM apresentou a maior RP na camada mais superficial do solo, atingindo o limite crítico na profundidade de 0,12 m e logo após começa a decrescer. Em um trabalho conduzido em solo com teor de argila de 68% e com umidade de 28,3%, Silva et al. (2000) determinaram que a partir da camada de 0,10 m a RP começou um decréscimo a medida que se aumentava a profundidade. O tráfego do pulverizador foi o maior responsável pelo aumento da RP, quando comparada ao tratamento ST. No momento da realização do teste de RP o solo se encontrava com umidade de 27,6%.

Após a semeadura da soja, novamente foi determinada a RP (Figura 14 B). Através da análise dos resultados fica evidenciado que nos locais sem tráfego (ST) a RP apresentou pouca variação, mantendo-se praticamente sem alterações em relação ao teste realizado logo após a semeadura do milho (Figura 14 A). Novamente o tratamento que apresentou maior RP foi aquele que ocorreu o tráfego máximo (TM) atingindo valores 3,5 MPa, sendo 75% maior que o considerado como crítico (2,0 MPa) segundo Tormena et al. (1998). Já os tratamentos

TP e TT na profundidade maior que 0,10 m os valores de RP superaram o valor crítico, sendo classificados como RP alta na classificação proposta por Arshad et al. (1996).



**Figura 14** – Resistência a Penetração (RP) em diferentes épocas de avaliação sendo (A), após semeadura do milho (2010). Após semeadura da soja no ano de 2012 (B) e após a colheita da soja em 2012 (C) com destaque para o limite crítico e classificada de acordo com Arshad et al. (1996) em um Latossolo Vermelho, Não Me Toque – RS.

Notadamente ocorreu um acréscimo nos valores de RP, quando comparados com a determinações anteriores, evidenciando que o tráfego de máquinas foi responsável por este aumento, uma vez que no tratamento ST a variação praticamente não ocorreu. Collares et al. (2008) estudando diferentes sistemas de manejo reportou um incremento na RP a partir de 0,10 m nos sistemas que apresentavam tráfego de máquinas quando comparado com o sistema de plantio direto sem tráfego em um Latossolo Vermelho. Anteriormente Streck et al. (2004) reportou que a RP sofreu um aumento significativo após o tráfego de um trator de 10 Mg até a profundidade de 0,28 m.

Logo após a colheita da soja, ao fim do experimento, uma nova determinação de RP foi realizada. Pode-se notar que o tratamento com ausência de tráfego não atingiu o limite considerado crítico, o mesmo comportamento foi observado no tratamento onde existiu o tráfego de trator (TT) (Figura 14 C).

Nos tratamentos com a presença do pulverizador a RP ficou acima do limite crítico, a partir da profundidade de 0,10 m que alcançou o máximo valor na camada 0,20 e 0,35 m respectivamente nos tratamentos TM e TP. Nos mesmos tratamentos o aumento foi de 34 e 65% respectivamente acima do considerado como limitante para o desenvolvimento das culturas. A umidade do solo no momento das determinações era de 23,5%.

#### 5.3.6 RP em função do número de passadas

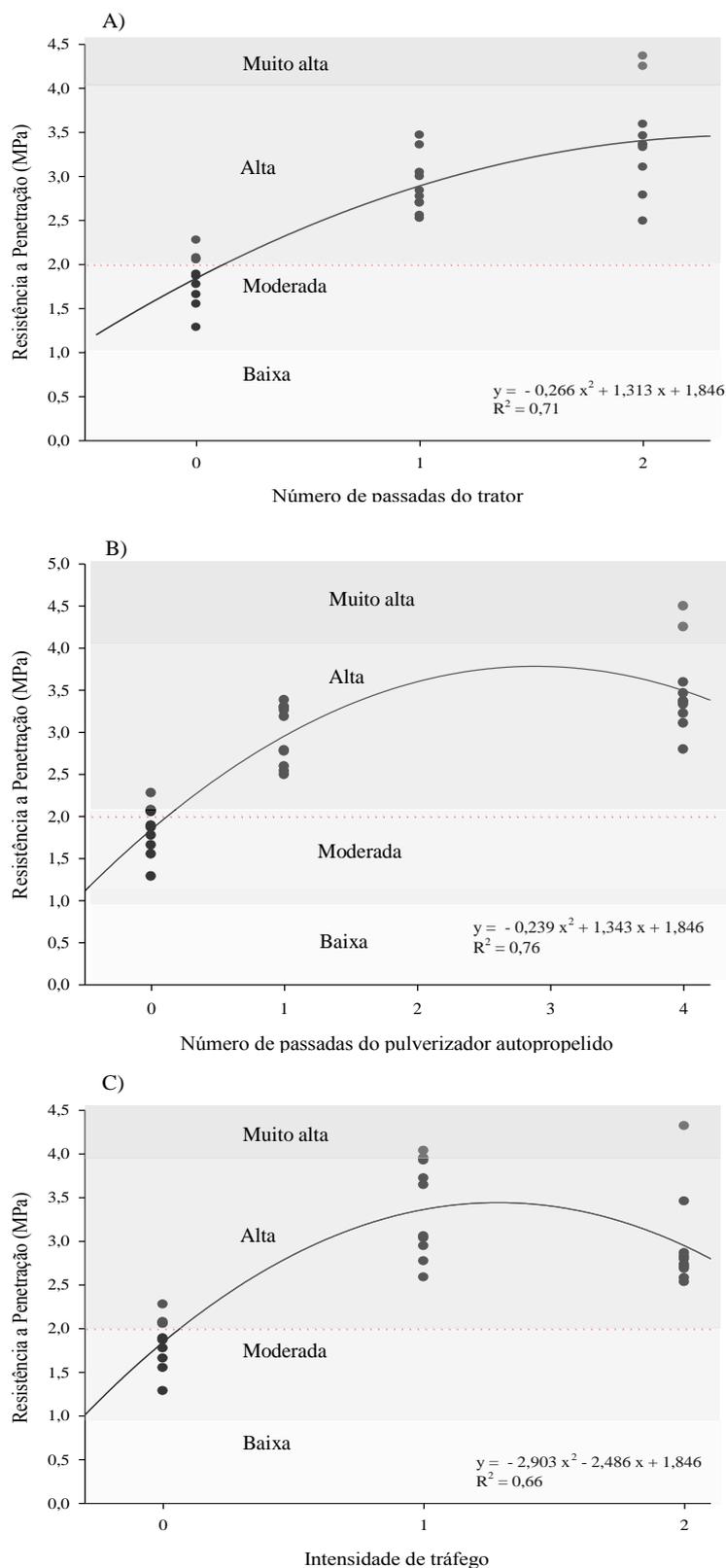
Os valores de RP, após o tráfego do trator apresentaram tendência de aumento conforme o incremento na quantidade de passadas do trator na área com uma correlação significativa positiva ( $R^2 = 0,71$ ,  $P < 0,05$ ). Nos locais livre do tráfego, a máxima RP encontrada foi de 2,27 MPa, no início das avaliações. Já o local que recebeu o tráfego máximo do trator, que foi duas passadas, a RP máxima encontrada foi de 4,36 KPa, um incremento de 92% na RP (Figura 15 A).

A mesma tendência de aumento da RP em função do aumento do número de passadas do trator foi reportado por Botta et al. (2002) que ainda verificaram que a RP foi o índice que melhor representou o aumento da compactação do solo, sendo que a mesma aumentou significativamente à medida que a intensidade do tráfego aumentou da ausência de tráfego até cinco passadas de um trator de porte pesado. Para Klein & Camara (2007), através do intervalo hídrico ótimo (IHO), em um Latossolo, reportaram o valor de 3,0 MPa, como

sendo associado ao ponto de murcha permanente da cultura da soja, o que neste experimento seria alcançado com o tráfego do trator de apenas uma passada. Este resulta suporta a adoção do tráfego controlado.

Os valores de RP após a passagem do pulverizador autopropelido apresentou uma correlação positiva entre o aumento do número de passes e o aumento da RP ( $R^2 = 0,76$ ,  $P < 0,05$ ) (Figura 15 B), apresentando um comportamento semelhante ao tráfego do trator. Deve-se ressaltar que os valores de RP são considerados altos segundo a classificação proposta por Arshad et al. (1996).

Este aumento na RP pode ser explicado pelas condições que ocorre o tráfego do pulverizador dentro da lavoura, em muitos casos o conteúdo de água no solo é elevado e o tráfego continua acontecendo, pois, neste tipo de operação o tempo de atuação é fundamental para que se tenha eficiência no controle de pragas e doenças, por isso as condições climáticas são mais importantes que as condições de trafegabilidade do solo (Freddi et al., 2007).



**Figura 15** – Resistência do Solo a Penetração (RP) em função do numero de passadas do trator (A), do pulverizador autopropelido (B) e pulverizador do pulverizador autopropelido + trator (C) em um Latossolo Vermelho e classificada de acordo com Arshad et al. (1996), durante dois anos de avaliação, Não Me Toque – RS. Onde: T0 = Ausência de tráfego, T1 = uma passada do pulverizador e do trator e T2 = quatro passada de pulverizador mais duas do trator.

No tratamento TM deve-se considera os locais com ausência de trânsito de pulverizador e trator (T0) uma passada de pulverizador mais uma de trator (T1) e finalmente quatro passadas de pulverizador mais duas de trator (T3). Nela pode-se observar que a correlação foi significativa positiva ( $R^2= 0,66$ ,  $P<0,05$ ), porém muito menor que nos demais tratamentos sendo possível identificar que após o primeiro tráfego de máquinas associadas foi o que mais causou aumento da RP (Figura 15 C).

Na segunda determinação observa-se que o efeito foi menor, uma vez que o solo já apresentava valores elevados de RP e com isso às passadas subsequentes não obtiveram pressão suficiente para causar problemas de aumento da RP, explicando assim a pouca variação encontrada nesta avaliação. O tempo entre as avaliações podem ter influenciado neste parâmetro, pois no período compreendido entre as determinações, a área sofre a influência do sistema radicular de três culturas diferentes, mantendo assim uma melhor estruturação do solo, que acabou atuando como dissipante das cargas nele exercidas (Reinert et al., 2008).



## 5.4 Conclusões

- O tráfego de máquinas dentro da lavoura foi o responsável por modificações nas propriedades físicas do solo, nas camadas até 0,10 m, sendo a RP o atributo mais sensível a intensidade do tráfego, apresentando incremento dos seu valores em profundidade maior que os demais equipamentos.
- A primeira passada das máquinas foi o responsável por um incremento na densidade do solo na camada de 00-0,05 m de 86, 77, e 86% nos tratamentos com tráfego de trator, pulverizador e tráfego máximo, respectivamente.
- A infiltração de água no solo sofreu as maiores reduções após o primeiro tráfego das máquinas na ordem de 80, 91 e 91% nos tratamentos com tráfego do pulverizador, trator e tráfego máximo, respectivamente. Porém ao final do segundo ano de avaliação os valores não apresentaram diferença entre os tratamentos.
- O pulverizador autopropelido é a máquina agrícola, que causou as maiores modificações na estrutura física do solo, apresentando uma correlação positiva entre a RP e o numero de passadas do trator e do pulverizador. Os valores máximos médios da RP foram 2,1; 3,1; 3.2 e 4,0 MPa nos tratamentos ST, TP, TT e TM respectivamente.



## 5.5 Referências Bibliográficas

- ALBA, P.J.; AMADO, T.J.C.; GIRARDELLO, V.C.; SCHOSSLER, D.S.; HORBE, T.A.N. & TRINDADE, B.S. Tráfego controlado em culturas de grãos no RS: princípios, desafios e resultados preliminares. *Revista Plantio Direto*, 112:40-47, 2011.
- ALVES, M.C. & SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. *Acta Sci.*, 26:27-34, 2004.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., ed. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D. & DRAGHI, L. Influence of the axle load, tyre size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J. Terramech.*, 39:47-54, 2002.
- BOTTA, G.F.; TOLON-BECERRA, A.; TOURN, M.; LASTRA-BRAVO, X. & RIVEIRO, D. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions, *Soil Tillage Res.*, 120:92-98, 2012.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S. & PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Tillage Res.*, 89:13-21, 2006.
- CHAMEN, W.C.T.; VERMEULNE, G.D.; CAMPBELL, D.J. & SOMMER, C. Reduction of traffic-induced soil compaction – a synthesis. *Soil Tillage Res.*, 24:303-318, 1992.
- CHAMEN, W.C.T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F. & WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic induce subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil Tillage Res.*, 73:161-174. 2003.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008
- DANIEL, L.A.; VOLPATO, C.E.S.; LUCARELLI, J. R.F. *Plantio direto: mecanização agrícola*. Brasília, DF: ABEAS/ UnB, 2000. 126 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979.

FARIAS, L.N.; BONFIM-SILVA, E.M.; PIETRO-SOUZA, W.; VILARINHO, M.K.C.; SILVA, T.J.A. & GUIMARÃES, S.L. Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. R. Bras. Eng. Ambiental, 17:497-503, 2013.

FLOWERS, M.D. & LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. Soil Tillage Res., 48:21-35, 1998.

FREDD, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARANTI, R.G. & LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho R. Bras. Ci. Solo, 31:627-636, 2007.

GASSEN, D. Tráfego controlado como alternativa para reduzir a compactação do solo. Revista Plantio Direto, 111: 4-10, 2011.

GASSO, V.; CLAUS, A.G.; SØRENSENS, F.W. & OUDSHOORN, O.G. Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. Europ. J. Agronomy, 48:66-73, 2013.

HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K.; Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, cause and possible solutions. Soil Tillage Res., 82:121-145, 2005.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. San Diego: Academic Press, 1982, 364p.

HØJ, J. Studium over traktorens udvikling 1970–2000. Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, Sektionen for Maskiner og teknik, Byggeri og teknik. 2011.

KELLER, T.; LAMANDE, M.; PETH, S.; BERLI, M.; DELENNE, J.Y.; BAUMGARTEN, W.; RABBEL, W.; RADJAI, F.; RAJCHENBACH, A.P.S. & OU, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction Soil Tillage Res., 128:61-80, 2013.

NEVENS, F. & REHEUL, D. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. Soil Tillage Res., 70:175-184, 2003.

- NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C. & BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja R. Bras. Ci. Solo, 32:1723-1734, 2008.
- NOVAK, L.R.; MONTOVANI, E.C.; MARTYN, P.J. & FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneus/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. Pesq. Agropec. Bras., 27:1587-1595, 1992
- PYTKA, J. Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. Soil Tillage Res., 82:77-88, 2005.
- RAPER, R.L. & KIRBY, J.M. Soil compaction: How to do it, Undo it, or Avoid doing it. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006, Louisville, Kentucky. Proceedings... St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. p.1-14.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. Ci. Ambiente, 27:29-48, 2003.
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C. & CUBILLA, M.M. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. R. Bras. Ci. Solo, 32:1805-1816, 2008.
- ROQUE, A.A.O; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S. & SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar Pesq. Agropec. Bras., 45:744-750, 2010.
- SADRAS, V.O.; O'LEARY, G.J. & ROGET, D.K.; Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. Field Crops Res., 91:131-148, 2005.
- SILVA, F.A.S. & AZEVEDO, C.A.V. Principal Components Analysis in the Software Assisat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ci. Rural, 34:399-406, 2004.

SOANE, B.D., The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.*,16:179-201, 1990.

SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. Van., 1.ed. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p. 01-21.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *C. Rural*, 34:755-760, 2004.

TREIN, C.R.; MACHADO, A.P. & LEVIEN, R. Compactação do solo por rodados, podemos evitá-la. *Revista Plantio Direto*, 114:28-35, 2009.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.

TULLBERG, J.N.; ZIEBARTH, P.J. & LI, Y. Traffic and tillage effects on run-off. *Aust. J. Soil Res.*, 39:249-257, 2001.

TULLBERG, J.N.; YUKE, D.F. & McGARRY, D. Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. *Soil Tillage Res.*, 97:272-281, 2007.

## 6 CAPÍTULO II

### **Influência do tráfego de máquinas no sistema radicular e produtividade das culturas de milho e soja em um Latossolo Vermelho sob o sistema de plantio direto**

#### **Resumo**

O manejo do solo visa fornecer condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, de modo que se possa explorar o potencial produtivo. No sistema de plantio direto o tráfego de máquinas, quando realizados em condições de elevada umidade do solo, pode gerar camadas compactadas de solo, que devido ao aumento da densidade e da resistência à penetração, dificultam o desenvolvimento do sistema radicular, tendo como resposta da cultura a redução na produção de massa seca da parte aérea e a produtividade de grãos. Para buscar um maior entendimento sobre a influência do tráfego de máquinas no desenvolvimento do sistema radicular, produção de massa seca e a resposta da cultura através dos seus componentes de rendimento e da produtividade da cultura do milho e da soja manejadas sob o sistema de plantio direto instalou-se um experimento no ano agrícola 2010/2011 e 2011/2012, no planalto do estado do Rio Grande do Sul sob um Latossolo Vermelho com os seguintes tratamentos: (a) Sem tráfego de máquinas, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do pulverizador (TP); (c) Tráfego de pneus com o conjunto trator-semeadora (TT); e (d) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do trator (TM). A temperatura média durante o ano é de 19,7°C e a precipitação oscilam entre 1500 – 1700 mm anual. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso. Foram realizadas determinações de massa seca da parte aérea, sistema radicular, componentes de rendimento e produtividade final das culturas. Não ocorreu diferença entre os tratamentos na produção de massa seca da parte aérea na cultura do milho. Já, na cultura da soja o tratamento ST foi o que apresentou maior produção massa seca. O sistema radicular do milho não foi influenciado pelo tráfego de maquinas agrícola. Porém, na cultura da soja o ST produziu raízes 50% mais compridas do que os tratamentos com tráfego. Os componentes de rendimento não sofreram influência do tráfego, todavia a produtividade final foi afetada negativamente no TM, com uma redução de 24% em relação ao tratamento ST. Na cultura da soja constatou-se a influência negativa do tráfego do pulverizador, que apresentou uma redução de 34% em relação ao ST e quando este tráfego foi associado ao tráfego do trator no tratamento TM a redução foi ainda maior, alcançando 42%. Neste trabalho, constatou-se que a intensidade de tráfego influenciou mais negativamente a cultura da soja do que a do milho.

**Palavra chave:** Tráfego controlado, compactação do solo, produtividade da cultura da soja e milho, raiz de milho e soja.

## 6.1 Introdução

O estado do Rio Grande do Sul é um dos principais produtores de grãos de país, destacando-se a soja e milho nos meses de verão e o trigo na época de inverno. A região do planalto do estado é onde se localiza as principais áreas produtoras, tendo como solo predominante o Latossolo (Embrapa 2006). O principal sistema de produção utilizado atualmente é o sistema de plantio direto (SPD).

O manejo do solo tem como finalidade criar as melhores condições para o desenvolvimento das culturas. Porém, quando o tráfego de máquinas agrícolas acontece em condições desfavoráveis (solo com elevada umidade), verificam-se modificações estruturais no solo, que irão dar origem a compactação (Tavares Filho et al., 2001). A degradação física de solos agrícolas que isolada ou associada com a degradação biológica e química, leva à redução da qualidade do solo, através do aumento da densidade e RP, redução na macroporosidade e infiltração de água, afetando o desenvolvimento do sistema radicular, com consequências negativas a produtividade das culturas cultivadas sob o sistema de plantio direto (Karlen et al., 1997; Reinert et al., 2008).

No SPD a ocorrência da compactação do solo é mais pronunciada em camadas superficiais, devido a ausência do revolvimento e ao intenso tráfego de máquinas agrícolas (Alves & Suzuky, 2004), sendo mais evidente em áreas sob sucessão de culturas (Reinert et al., 2008), uma vez que em sistema com rotação de culturas, as plantas de cobertura atuam na melhoria da qualidade física do solo, aliviando o efeito da compactação (Tormena et al., 2004).

Segundo Flowers & Lal (1998), a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita. Horn & Lebert (1994) acrescentaram que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas provocadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento. Chamen et al. (2011) complementam que a intensidade e a quantidade de tráfego atua na severidade da compactação. Nas últimas décadas, tem-se verificado o aumento da utilização de máquinas agrícolas, assim como o da carga aplicada por unidade de área que resulta na degradação física do solo (Horn et al., 2000).

Incrementos na RP aumentam a energia necessária para o desenvolvimento das raízes das plantas e diminuem a alongação e o crescimento radicular (Lipiec & Hatano, 2003). Em

um Latossolo Vermelho distroférico de textura média, Foloni et al. (2003) observaram que o crescimento radicular do milho, foi reduzido em 50%, quando a RP foi igual a 0,75 Mpa, e foi totalmente inibido quando ela chegou a 1,4 MPa. Já Meroto Junior & Mundstock (1999) verificaram que a RP de 2 MPa ocasionou redução na produção de massa seca e do comprimento radicular do trigo, enquanto que, para 3,5 MPa, as restrições foram mais severas, uma vez que o alongamento radicular só é possível quando a pressão radicular é maior que a impedância mecânica do solo (Camargo & Alleoni, 1997).

Valores elevados de RP causam aumento do diâmetro das raízes na camada compactada por provocar modificações morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem ao meio. As raízes diminuem de diâmetro para penetrar nos pequenos poros, pois a resistência mecânica do solo estimula a proliferação de raízes laterais (Foloni et al., 2003), mas não afetaram o produção de massa seca da parte área da cultura de milho (Rosolem et al., 1994). Inclusive, em níveis intermediários de compactação do solo, podem ocorrer incrementos na produção de massa seca da parte área (Gediga, 1991).

O aprofundamento do sistema radicular é extremamente importante em culturas não irrigadas. Segundo Stone (1976) apenas uma pequena porção de raízes na camada mais profunda do solo seriam suficientes para o suprimento da água para a cultura. Na existência de camadas compactadas, o aprofundamento do sistema radicular é prejudicado, concentrando-se próximo a superfície, tornando a cultura mais sensível a déficit hídrico de curta duração (Gonçalves et al., 2006). Os efeitos negativos do tráfego de máquinas agrícolas nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular podem perdura por até cinco anos, na camada até 0,10 m (Radford & Yule, 2001).

O reflexo do adensamento do solo no desenvolvimento do sistema radicular, ocasionando menor desenvolvimento ainda é controverso. Giarola et al. (2009), constataram em um Latossolo Vermelho, que os componentes de produção de diferentes cultivares de soja não foram influenciadas pelos diferentes níveis de compactação do solo investigado, sendo eles SPD sem tráfego de máquinas e SPD com quatro passadas de trator. Em um Argissolo Vermelho com 285 g kg<sup>-1</sup> de argila a produção de parte aérea e a área foliar da soja não foram influenciados pela intensidade de tráfego (Mazurana et al., 2013).

A produtividade de milho, em um Argissolo Vermelho, sofreu redução de 23% no desenvolvimento do sistema radicular sob condição de compactação do solo (Albuquerque & Reinert, 2001). Anteriormente, Al-Adawi & Reeder (1996) determinaram que após o tráfego de uma carreta de transporte de grãos, com peso de 11 Mg por eixo, a produtividade do milho foi reduzida em até 43%.

Secco (2003) investigando o efeito de estados de compactação em Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférrico, ambos manejados sob SPD, verificou que o estado de compactação mais intenso, ocasionou decréscimos na produtividade do trigo, milho e soja de 18,3; 34,0 e 24,3%, respectivamente. Em anos em que não há restrições hídricas Cardoso et al. (2006), verificaram que a presença de camadas compactadas no perfil do solo não afetou a produtividade de soja.

De maneira geral, a resposta das culturas que sofrem a ação do tráfego de máquinas é bastante variada, em alguns casos o ligeiro adensamento do solo pode ser positivo, já na maioria dos casos a produtividade é afetada negativamente especialmente se for associada a ocorrência de déficit hídrico severo (Reinert et al., 2008).

O objetivo deste experimento foi determinar a influência do tráfego de máquinas no desenvolvimento do sistema radicular, produção de massa seca e a resposta da cultura através dos seus componentes de rendimento e da produtividade da cultura do milho e da soja, manejadas sob o sistema de plantio direto.

## 6.2 Material e Métodos

### 6.2.1 Localização e tratamentos

O trabalho foi realizado nos períodos agrícolas de 2010/2011 e 2011/2012, em uma área no município de Não Me Toque - RS, latitude -28 30' 37.41" e longitude -52 46' 55.84", seguindo o Datum WGS 84 e altitude média 471 m. As características de clima e de solo, o histórico da área e a descrição dos tratamentos estão compondo o item 4.1 (Material e Métodos).

O experimento teve a duração de duas safras agrícolas de verão, sendo a cultura de milho (*Zea Mays*) no ano de 2010/2011 e a cultura da soja (*Glycine Max*) no ano agrícola 2011/2012, a cultura de cobertura durante o período de inverno entre as safras de verão foi aveia preta (*Avena strigosa*). Os tratamentos investigados foram: (a) Sem tráfego de pneus, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do pulverizador (TP); (c) Tráfego de pneus com o conjunto trator-semeadora (TT); e (d) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do trator (TM).

### 6.2.2 Determinação da produção de massa seca

Para determinação da produção de massa seca da parte área, no momento do pleno florescimento foi feita o corte de plantas rente ao solo, em uma área de 1m<sup>2</sup>. Para o tratamento TM foi coletado o número de plantas igual ao número existente no tratamento ST, uma vez que neste tratamento não é possível fazer o corte de plantas de uma área específica. Após o corte da parte área, as amostras foram secas em uma estufa com circulação de ar forçado, com temperatura média de 65°C até atingir peso constante. Após pesadas em balança digital, de forma manual, extrapolado os valores para a área de um hectare. Foram realizadas cinco amostras por tratamento em cada bloco, totalizando quinze amostras por tratamento.

### 6.2.3 Avaliação do sistema radicular

A determinação do sistema radicular das culturas foi realizada no momento do pleno florescimento, com três repetições em cada tratamento, através de imagens fotográficas. Para isso abriu-se trincheiras no solo com tamanho de 1,00 m de largura por 0,50 m de profundidade, perpendiculares a linha de semeadura e com distância de 0,03 m do colmo da planta. Em um primeiro momento procedeu-se a limpeza manual da “face” para a exposição do sistema radicular, de modo a se obter melhor qualidade fotográfica. As raízes expostas foram lavadas com uma solução sobre pressão de água e 10% de peróxido de hidrogênio para o branqueamento das raízes, possibilitando assim melhor contraste fotográfico (JORGE & CRESTANA, 2006) e adaptada para as necessidades específicas do trabalho.

Após a preparação da trincheira, introduziu-se no solo uma estrutura de madeira dividida em quadriculas de 0,10 x 0,10 m formadas por fio de nylon preto (3 mm de diâmetro) formando referências para posterior pós processamento digital. Este processo foi realizado com o programa Corel Draw 12 para se obter o contraste necessário na utilização do programa SIARCS 3.0® (Sistema Integrado para Análises de Raízes e Cobertura do Solo) desenvolvido por (CRESTANA, 1994).

## 6.2.4 Produtividade

### 6.2.4.1 Componentes de rendimento

Os componentes de rendimento da soja investigados foram: número de vagens por plantas, número de grãos por vagem e a massa de grãos. Para determinação do número de legumes por planta contou-se o número de legumes em uma amostra de 10 plantas, e usou a média das plantas coletadas em cada parcela. Na determinação do número de grãos por legumes e planta contou-se o número de grãos em uma amostra de 10 plantas, e usou a média das plantas coletadas em cada parcela. Por fim foi determinado o peso de 1000 grãos.

### 6.2.4.2 Produtividade total

Para determinação da produtividade total foi realizada a colheita de forma manual em quinze pontos em cada tratamento. O tamanho de cada ponto foi determinado em função da cultura avaliada. Na cultura do milho foi feita a colheita em 2 metros lineares. A cultura da

soja, foi colhida 1 m<sup>2</sup>. Após levadas ao laboratório as amostras foram debulhas, limpas de impurezas e determinada a umidade dos grãos, para posterior ajuste a 13% de umidade.

#### 6.2.5 Delineamento Experimental

O delineamento experimental seguiu o modelo blocos inteiramente casualizados, com três blocos (60 X 40 m), totalizando uma área experimental de 7.200 m<sup>2</sup>. Os dados foram submetidos à análise de variância, com uso do programa computacional ASSISTAT 7.6 beta (Silva & Azevedo, 2009) sendo as médias comparadas entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.



## 6.3 Resultados e Discussão

### 6.3.1 Produção de massa seca da parte aérea

Nos resultados da produção de massa seca da parte aérea das culturas do milho não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos avaliados, ressaltando que no tratamento TM teve produção 6 % menor de massa seca da parte aérea que o tratamento TT (Quadro 4).

**Quadro 4** – Produção média da massa seca da parte aérea da cultura do milho no ano de 2010/11 e da soja no ano 2011/12 em função dos diferentes tratamentos em um Latossolo Vermelho distrófico. Não Me Toque - RS.

Tratamentos	Massa seca	
	Milho	Soja
	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----	
ST	8,810 <sup>(1)</sup>	2,411 a
TP	8,944	1,749 b
TT	9,170	2,523 a
TM	8,659	1,848 b
Teste F	1,08 <sup>ns</sup>	10,30*
CV (%)	7,01	16,96

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TP= área com tráfego do pulverizador autopropeleido,TT= área com tráfego de pneus do trator, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropeleido mais área com tráfego de pneus do trator. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna e profundidade, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

O tratamento TT apresentou um ligeiro aumento na Ds do solo (Quadro 3, cap. I), o que pode ter sido o responsável pela melhoria do contato solo/raiz, favorecendo a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, aumentando a produção de fitomassa pela parte aérea. Neste sentido, Guimarães et al. (2002), na cultura do feijão, reportaram aumento da produção de massa seca com densidade próxima a 1,20 Mg m<sup>-3</sup>, segundo os autores este aumento aconteceu pela melhoria no contato solo/semente.

No segundo ano de experimento observou-se que os tratamentos apresentaram diferença estatística entre si, na área livre de tráfego de máquinas (ST) a produção de massa seca foi igual ao tratamento com TT. Nos tratamentos com a presença do pulverizador a

produção de massa seca foi de 23,3 e 27,5% menor para os tratamentos TM e TP, respectivamente, em relação ao tratamento ST. A diferença entre a maior produção de massa seca que foi encontrada no TT e o TM que produziu a menor, foi de 774 kg ha<sup>-1</sup>.

Como nos níveis mais intensos de tráfego, no tratamento TM ocorreu uma redução significativa da macroporosidade (Quadro 3, cap. I), associado aos elevados valores de RP (Figura 19, cap. I) foi verificado uma restrição ao desenvolvimento das raízes (Figura 16), tanto quanto na produção de fitomassa, pela parte aérea. Fatores estes que limitam o desenvolvimento das plantas.

No primeiro ano após a implantação do sistema de tráfego controlado não se obteve resposta negativa da cultura do milho ao tráfego de máquinas na produção de massa seca, pelo fato que os níveis de compactação causados pelo tráfego foram leves, não suficientes para alterar a estrutura do solo, que foi adquirida em mais de 15 anos de utilização do SPD. No segundo ano com o acúmulo de tráfego das máquinas, a cultura da soja respondeu negativamente ao trânsito, apresentando menor produção de massa seca.

### 6.3.2 Componentes de rendimento

#### 6.3.2.1 *Cultura do milho*

Para os componentes da produtividade do milho, não foram observadas diferença estatística entre os tratamentos, sugerindo que no primeiro ano do experimento a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas não influenciou estes parâmetros (Quadro 5). As condições climáticas (Figura 4, cap. I) favoreceram para o bom desenvolvimento dos grãos.

**Quadro 5** – Número de grão, numero de 2ª espigas, numero de fileiras por espiga, numero de grãos por fileira e peso de 100 grãos (g) em função do tráfego de máquinas, Não Me Toque – RS.

Tratamentos	nº espigas por 1 m <sup>2</sup>	nº 2ª espiga por 1 m <sup>2</sup>	nº fileiras por espiga	nº de grãos por fileira	Peso de 100 grãos (g)
ST	7,02 <sup>(1) ns</sup>	1,00 <sup>ns</sup>	16,42 <sup>ns</sup>	32,52 <sup>ns</sup>	33,79 <sup>ns</sup>
TP	6,68	1,33	16,13	32,67	34,15
TT	6,67	1,20	15,95	34,15	34,82
TM	4,45	1,33	15,73	33,82	34,62
CV (%)	10,93	-	3,02	4,68	4,46

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TP= área com tráfego do pulverizador autopropelido, TT= área com tráfego de pneus do trator, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido mais área com tráfego de pneus do trator. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

### 6.2.3.2 Cultura da Soja

A compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas influenciou a quantidade de legumes com dois grãos (Quadro 6). O tratamento TP diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, produzindo quatro legumes com dois grãos a mais que o tratamento ST.

**Quadro 6** – Número de grãos por vagens, número total de vagens e peso de 1000 grãos (g) em função do tráfego de máquinas. Não Me Toque - RS.

Tratamentos	-----Número de vagens-----				Peso de 1000 grãos (g)
	1 grão	2 grãos	3 grãos	Total	
ST	3,20 <sup>(1) ns</sup>	14,42 b*	15,05 <sup>ns</sup>	32,73 <sup>ns</sup>	174,35 a*
TP	2,63	18,60 a	15,48	36,80	166,43 b
TT	3,55	15,38 ab	13,50	32,43	172,46 ab
TM	3,18	17,80 ab	16,38	37,41	168,24 ab
CV (%)	53,28	23,16	22,41	19,40	4,42

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, P= área com tráfego do pulverizador autopropelido, T= área com tráfego de pneus do trator, P+T= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido mais área com tráfego de pneus do trator. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

No peso de 1000 grãos foram encontradas diferença estatística entre os tratamentos, o tratamento ST 5% a mais que o TP. Com esses resultados pode-se inferir que o tratamento

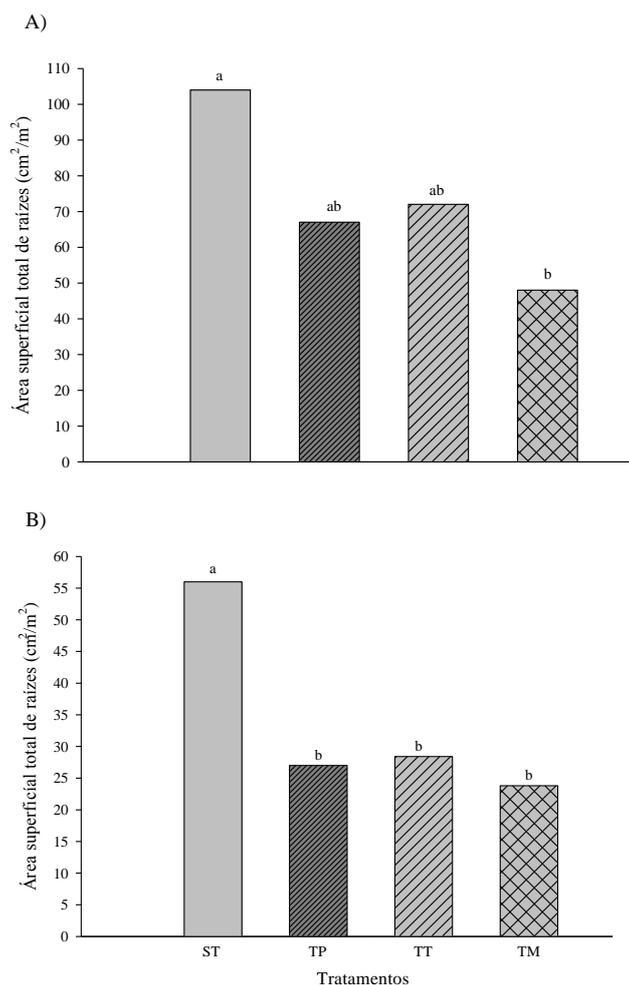
ST embora tendo um número menor de grãos por legumes e número total de vagens, apresentou o maior peso de 1000 grãos. No sentido oposto, o tratamento TP teve maior quantidade de legumes, de grãos por vagens, mas apresentou o menor peso de 1000 grãos, que refletem na produtividade final de cada tratamento.

### 6.3.3 Sistema Radicular

A produção de raízes da cultura do milho durante a safra 2010/2011 apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos (Figura 16 A). Os tratamentos com tráfego de máquinas foram responsáveis pela redução em 34,9; 35,0 e 55,3% nos tratamentos TP, TT e TM respectivamente na área total explorada pelas raízes do milho. Os tratamentos TP e TT não se diferenciam estatisticamente entre si e nem do ST, somente quando seus efeitos são acumulados é que apresenta efeito negativo, reduzindo o desenvolvimento do sistema radicular.

O crescimento radicular esta relacionado com fatores químicos e, principalmente, fatores físicos, entre eles a disponibilidade de água, aeração e a RP, sendo esta o fator de maior influência (Rosolem et al., 1994), na (Figura 17, cap. I) os resultados da RP após a semeadura do milho, evidenciaram a dificuldade que o sistema radicular encontrou para se desenvolver. Os mesmos autores determinaram redução de 50% no crescimento radicular da cultura do milho quando a RP foi de 1,42 MPa. Neste trabalho a RP atingiu valores mais elevados.

Os resultados com a cultura da soja, no ano agrícola 2011/2012, evidenciaram um efeito do tráfego de máquinas no desenvolvimento do sistema radicular da cultura, pois a área de raízes produzidas foram 58,2; 52,1 e 49,5% menores nos tratamentos TM, TP e TT respectivamente, quando comparados ao ST (Figura 16 B).



**Figura 16** – Distribuição do volume de raízes do milho na safra agrícola 2010/2011 (A) e da soja na safra agrícola (2011/2012). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. ( $p < 0.05$ ), Não Me Toque - RS. Onde: ST = Sem tráfego, TP = Tráfego do pulverizador autopropelido, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo.

Os prejuízos gerados pelo tráfego de máquinas agrícolas, especialmente os com presença do pulverizador, no desenvolvimento radicular pode ser constatado na Figura 23. Estes resultados estão associados a menor área de contato dos pneus com o solo, quando comparado com o trator, acaba gerando uma maior pressão no solo, formando camadas mais compactadas que restringem o desenvolvimento das raízes. O aumento da RP é o maior responsável pela redução no desenvolvimento radicular das culturas (Botta et al., 2006; Suzuki et al., 2007).

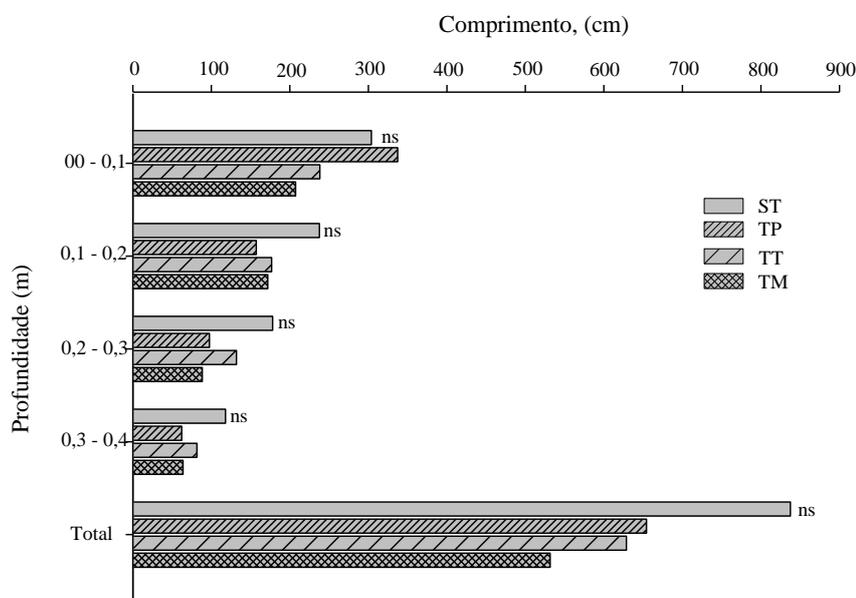
Os resultados de RP apresentados neste trabalho (Figura 19, cap. I) estão de acordo com o desenvolvimento radicular. O incremento na RP, ocasiona o aumento da demanda de energia para o desenvolvimento das raízes das plantas, uma vez que a raiz terá que deslocar mecanicamente partículas de solo que estão fortemente agrupadas devido à compactação

causada pelo tráfego de máquinas (Lipiec & Hatano, 2003). Em anos com déficit hídrico, a redução na produtividade está associado ao sistema radicular pouco desenvolvido e ao aumento da RP.

Ainda existem muitas dúvidas sobre os limites críticos da RP para o desenvolvimento do sistema radicular, neste trabalho os valores acima de 1,5 MPa induziram reduções no desenvolvimento das raízes na cultura da soja. Corroborado com o proposto por Zou et al. (2001) que sugeriram um intervalo de RP com valores superiores a 1,3 até 1,5 MPa como impeditivo ao crescimento radicular. Em um estudo com diferentes graus de compactação causado pelo tráfego de máquinas Lima et al. (2010) determinou que a RP crítica ao desenvolvimento de soja e de feijão foi de aproximadamente 1,3 MPa.

### 6.3.3.3 Desenvolvimento radicular do milho estratificado por camadas de solo

O comprimento das raízes do milho não apresentou diferença estatística entre os tratamentos em cada camada e camadas avaliadas após a aplicação dos tratamentos (Figura 17). Ressalta-se que em todas as camadas estudadas o tratamento ST apresentou o maior comprimento que os demais tratamentos, com exceção da camada superficial. No comprimento total também não foi observado diferença entre os tratamentos.

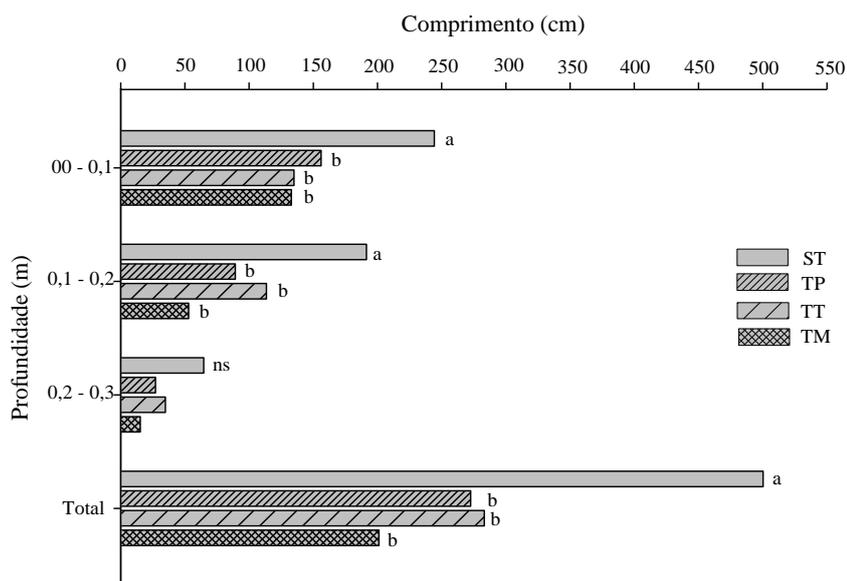


**Figura 17** – Comprimento total das raízes do milho, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Não Me Toque - RS.

A redução do comprimento total das raízes do milho pode ser explicada através de modificações fisiológicas do sistema radicular, que em situações de hipóxia (ausência parcial de oxigênio) aumenta a produção de etileno, e ácido abscísico (ABA), como resposta das plantas ocorre a epinastia, inibição de caule, produção de massa seca da parte aérea, além da redução do sistema radicular (Silva et al., 2004). Neste sentido He et al., (1996) determinaram que a hipóxia promove a formação de aerênquimas na cultura do milho, como consequência do elevado nível de etileno nas raiz. Estes autores reportaram que as raízes sujeitas ao estresse mecânico apresentam um aumento considerado nos níveis de etileno. Os valores de macroporosidade associado com as condições climáticas, com precipitações elevadas e bem distribuídas podem ter favorecido para a criação de um microambiente com uma leve restrição de oxigênio no solo, causando assim reduções no desenvolvimento radicular.

#### *6.3.3.4 Desenvolvimento radicular da soja estratificado por camadas de solo*

No ano seguinte, a cultura da soja apresentou diferença estatística no comprimento do sistema radicular após a realização dos tratamentos (Figura 18). Na camada superficial, até 0,1m o tratamento ST produziu 244 cm de raiz, sendo 36 e 45% maior o comprimento total que os tratamentos TP e TT respectivamente. Na camada até 0,2 m o comportamento foi semelhante, com o ST produzindo 191 cm, sendo 63, 40 e 78% a mais no comprimento das raízes dos tratamentos TP, TT e TM, respectivamente. A camada de solo entre 0,2 até 0,3 m não apresentou diferenças significativas, o tratamento que teve maior comprimento de raiz foi o ST com 64 cm. No somatório de todas as camadas, o ST apresentou 250 cm a mais de comprimento total que os tratamentos tráfego, sendo estatisticamente diferentes dos demais. Este comportamento pode ser explicado aumento da densidade do solo (Quadro 4, cap. I ) que aumenta a medida que aumenta a profundidade do solo e pelo aumento da RP (figura 19, cap. I).



**Figura 18** – Comprimento total das raízes da soja, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Não Me Toque - RS.

A produção total de raízes na camada superficial foi quatro vezes maior que a camada mais superficial estudada na cultura da soja. A distribuição das raízes na camada superficial atingiu 49%, já na camada intermediária este valor alcança 39% e na camada mais profunda do estudo é de 12%. Esta redução pode ser explicada pelo sistema de manejo empregado na área, uma vez que o SPD possui uma concentração do sistema radicular na superfície do solo, uma vez que neste local existe uma maior concentração de nutrientes e presença de macroporos e bioporos e espaços vazios entre agregados (Abreu et al., 2004) além do estado estrutural do solo ser mais homogêneo.

Ainda a compactação do solo no SPD é encontrada nas camadas mais superficiais, na camada de 0,08-0,15 m, devido a ausência de revolvimento e ao tráfego intenso das máquinas, principalmente em condições de elevada umidade do solo (Suzuki et al., 2007; Reichert et al., 2003).

Em estudos anteriores Gregory (1992) encontrou em condições normais de cultivo uma distribuição de aproximadamente 70-80% do sistema radicular da soja esta localizada nos primeiros 0,15 m do solo. O crescimento das raízes foi estudado por Sadras et al. (2005) que encontrou uma redução significativa e gradual a partir da superfície até camadas mais profundas do solo.

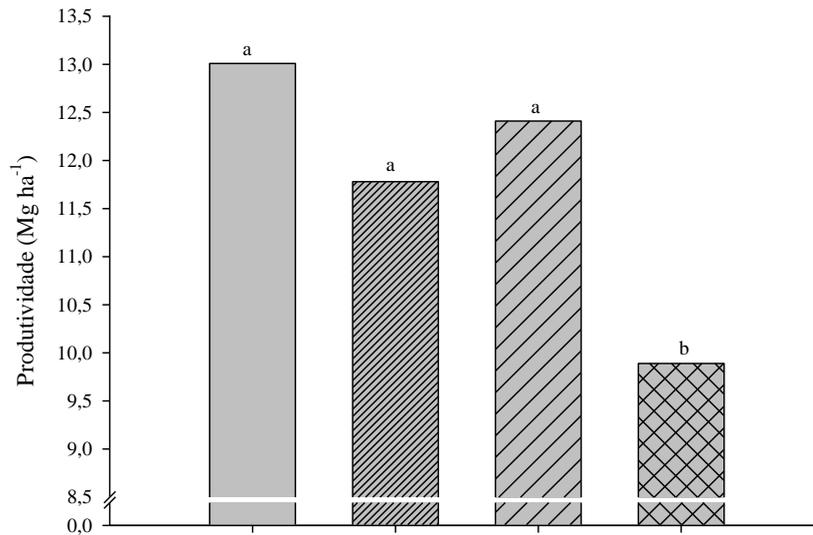
O comprimento radicular é uma informação relevante que reflete a capacidade de determinada espécie emitir raízes e ocupar/explorar o solo, o que resulta em benefícios à planta e ao solo. Esses poros são importantes para a infiltração de água e difusão de gases,

concorrendo para a melhoria das condições físicas do solo e para melhor crescimento do sistema radicular das culturas cultivadas em sequência.

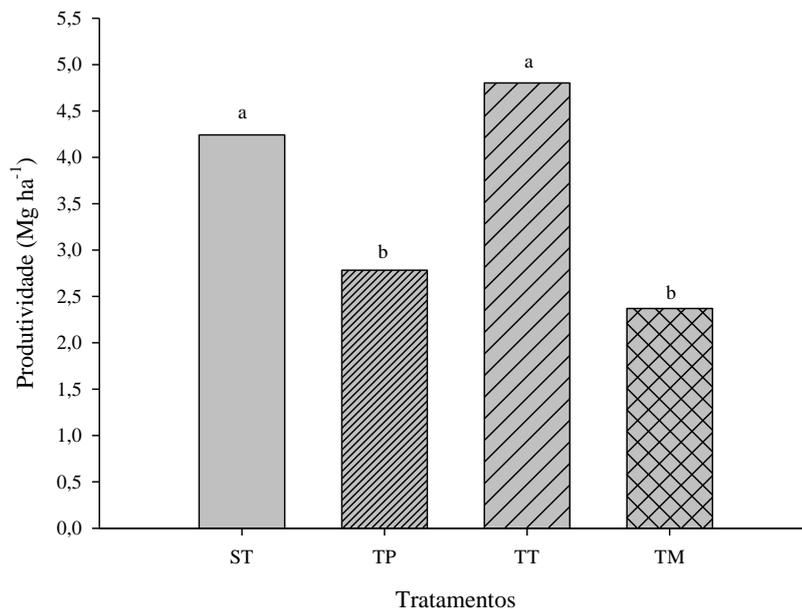
#### 6.3.4 Produtividade das culturas

A produtividade da cultura do milho foi influenciada pelo tráfego de máquinas. O TM ocasionou reduções de 31,5; 16,0 e 25,4 % em relação aos tratamentos ST, TP e TT, respectivamente, sendo diferente estatisticamente entre os tratamentos estudados. O tratamento ST teve produtividade de grãos superior, sendo ela 5,0; 4,5 e 24,0 % superior que os tratamentos TP, TT e TM respectivamente (Figura 19 A).

A)



B)



**Figura 19** – Produtividade média da cultura do milho na safra agrícola 2010/2011 (A) e da soja na safra agrícola (2011/2012). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. ( $p < 0,05$ ), Não Me Toque - RS. Onde: ST = Sem tráfego, TP = Tráfego do pulverizador autopropelido, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo.

A influência negativa do tráfego acumulado de máquinas agrícolas no tratamento TM induziu os maiores e menores valores de densidade do solo e macroporosidade respectivamente (Quadro 3, cap. I), afetando negativamente a produtividade do milho. Em um estudo sobre tráfego controlado nas culturas de milho, trigo e sorgo, realizado pela Aciar

(1998), na Austrália, foi reportado que a produtividade média dos grãos cultivados sob tráfego controlado foi 16% maior do que quando cultivados de maneira convencional.

Na Romênia, Canarache et al. (1984) reportaram que para cada 1 kg/m<sup>3</sup> de aumento da densidade do solo, causada por trânsito de máquinas, a diminuição na produção de grãos de milho foi de 18% em relação ao rendimento de um solo não compactado.

Wolkowski (1991) investigando o efeito do tráfego de máquinas na compactação e na disponibilidade de nutrientes para o crescimento da cultura do milho, verificou que em condições de compactação as perdas de nitrogênio, por desnitrificação tendeu a aumentar, uma vez que o aumento da compactação provocou condições anaeróbias quando o solo está úmido, condição essa que predominou durante o ciclo da cultura com precipitações pluviométricas bem distribuídas (Figura 1, cap. I).

Ainda existem dúvidas sobre a intensidade da compactação necessária para causar a redução da produtividade do milho. No continente australiano Li et al. (2007) comparando em um Vertissolo locais que não sofreram o tráfego de pneus com uma passagem anual de um trator de 100 kW (máquina mais leve que a utilizada neste trabalho) reportaram que o rendimento das culturas de verão (milho, sorgo) foi em média 7,3% na ausência de tráfego.

Cardoso et al. (2006) concluíram que a presença de camadas mais compactas no perfil do solo não alterou a produtividade de grãos devido à adequada disponibilidade hídrica durante o período avaliado. De maneira análoga, Sequinato (2010) não encontrou diferença significativa, quando avaliada a produtividade do milho, nas áreas trafegadas por rodados de trator agrícola e nas linhas de semeadura não trafegadas. Embora, o solo não trafegado tenha apresentado uma melhor qualidade físico-hídrica em comparação ao solo trafegado.

Na cultura da soja a produtividade também apresenta diferença estatística entre os tratamentos, a maior produtividade foi observada no tratamento com apenas a passagem de trator, produzindo cerca de 560; 2,020 e 2,430 kg ha<sup>-1</sup> a mais que os tratamentos ST, TP e TM, respectivamente (Figura 19 B).

Quando se relativiza os tratamentos, considerando o ST como sendo o de referência os resultados demonstram uma redução de 34,4 e 42,6% no TP e TM, respectivamente. Ressalta-se que as condições climáticas foram favoráveis ao desenvolvimento da cultura da soja, com índices pluviométricos normais.

A diferença na produtividade esta relacionada com o aumento da densidade (Quadro 4, cap. I), aumento da RP (Figura 19, cap. I), que foram os responsáveis pela redução do sistema radicular ( Figuras 1 e 2 ). Diferente da cultura do milho, estas alterações no solo e da cultura refletiram negativamente na produtividade da soja, especialmente onde existiu o

tráfego do pulverizador, que devido a sua menor área de contato pneu/solo, causou as maiores alterações na estrutura do solo.

Na Austrália, produtividades relatadas por Tulberg et al. (2007) durante seis anos com nove safras diferentes (sorgo, trigo e milho) apresentaram em média um incremento de 23%, quando o tratamento livre de trânsito foi comparado com os locais com compactação extra causa pelo passe de máquinas.

Quando se compara a produtividade obtida na safra anterior do milho (Figura 26) observa-se a mesma tendência, em que os locais isentos de tráfego de pneus apresentaram as maiores produtividades juntamente ao TT, sendo os mesmos considerados iguais estatisticamente nos dois anos avaliados. De forma contrária, o tratamento com a máxima trafegabilidade de máquinas (TM) apresentou reduções no rendimento de 24,0 e 42,6% para a safra do milho e de soja, respectivamente quando comparada com o tratamento isento de tráfego (ST).

Esta redução na produtividade das culturas onde existe a maior compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas também foi anteriormente reportado por Colares et al. (2008) que encontraram uma redução de 17% no rendimento da cultura do feijão após quatro passadas de máquinas em um Latossolo Vermelho quando comparado ao sistema de plantio direto sem compactação.

Recentemente Chamen (2011) verificou que ocorreu redução de até 15% na produtividade das culturas submetidas ao tráfego, em solos com elevada umidade, de máquinas de até 10 Mg, condições esta semelhante ao experimento no talhão Schimidt.

## 6.4 Conclusões

- A produção de massa seca da parte aérea da cultura do milho não sofreu redução, após o tráfego de máquinas agrícolas em um Latossolo, diferentemente da cultura da soja que apresentou reduções significativas após a passagem do pulverizador.
- O sistema radicular da soja sofreu reduções na sua área e no comprimento total, além de reduções a medida que se se aprofunda o sistema radicular no solo.
- A produtividade das culturas foi afetada negativamente pelo tráfego de máquinas, sendo 24% e 42% menor na cultura do milho e da soja, respectivamente. Entre as máquinas agrícolas, o tráfego do pulverizador autopropelido foi o mais deletério a produtividade das culturas.
- A cultura da soja em resposta ao tráfego de máquinas ao solo apresentou menor produção de massa seca, desenvolvimento do sistema radicular e produtividade.



## 6.5 Referências Bibliográficas

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.
- AUSTRALIAN CENTRE FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH - ACIAR. Project 9209: Conservation tillage and controlled traffic, Canberra, 1998.
- AL-ADAWI, S.S. & REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. Trans. Am. Soc. Agron. Eng., 39:1641-1649, 1996.
- ALBUQUERQUE, J.A. & REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. R. Bras. Ci. Solo, 25:539-549, 2001.
- ALVES, M.C. & SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. Acta Sci., 26:27-34, 2004.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H. & FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. Soil Tillage Res., 86:9-14, 2006.
- CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.
- CANARACHE, I. COLIBAS, M. COLIBAS, I. HOROBEANU, V. PATRU, H. & TRANDAFIRESCU, S. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. Soil Till. Res., 4:199-213, 1984.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. Pesq. Agropec. Bras. 41:493-501, 2006.
- CHAMEN, W.C.T. The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil type, PhD Thesis, SCHOOL OF APPLIED SCIENCES, 305p. 2011.

- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FLOWERS, M.D. & LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 48:21-35, 1998.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. & LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:947-953, 2003.
- GEDIGA, K. Influence of subsoil compaction on the uptake of  $^{45}\text{Ca}$  from the soil profile and on maize yield. *Soil Tillage Res.*, 19:351- 355, 1991.
- GIAROLA, N.F.B.; BRACHTVOGEL, E.L.; FONTANIVA, S.; PEREIRA, R.A. & FIOREZE, S.L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. *Acta Scien.* 31:641-646, 2009.
- GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P. & PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. *Eng. Agríc.* 26:67-75, 2006.
- GREGORY, P.J. Crescimiento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. Madrid: Mundi-Prensa, 121-175, 1992.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. & MOREIRA, A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 6:213-218, 2002.
- HE, C.; FINLAYSON, S.A.; DREW, M.C.; JORDAN, W.R. & MORGAN, P.W. Ethylene biosynthesis during aerenchyma formation in roots of maize subjected to mechanical impedance and hypoxia. *Plant Physiol.*, 12:1679-1685, 1996.

- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., ed. Soil compactation in crop production. Amsterdam, Elsevier, 45-69, 1994.
- HORN, R.; VAN DEN AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J. Subsoil compaction distribution, processes and consequences Reiskirchen: Catena, Verlag 2000, 462p.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F. & SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:4-10, 1997.
- LAL, R. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Advances Agronomy*, 42:85-97, 1989.
- LI, Y.X.; TULLBERG, J.N. & FREEBAIRN, D.M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil Tillage Res.*, 97:282-292, 2007.
- LIMA, C.L.R de; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SUZUKI, L.E.A.S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 45:89-98, 2010.
- LIPIEC, J. & HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116:107-136, 2003.
- MAZURANA, M.; FINK, J.R.; SILVEIRA, V.H.; LEVIEN, R.; ZULPO, L. & BREZOLIN, D. Propriedades físicas de solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:1185-1195, 2013.
- MEROTTO JUNIOR, A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:197-202, 1999.
- RADFORD, B.J.; YULE, D.F.; McGARRY, D. & PLAYFORD, C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Till. Res.*, 61:157-166, 2001
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C. & CUBILLA, M.M. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1805-1816, 2008.

- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSE, H.F. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. R. Bras. Ci. Solo 18:491-497, 1994.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under Conventional and no-tillage system. Sci. Agric., 61:451-456, 2004.
- SADRAS, V.O.; O'LEARY, G.J. & ROGET, D.K. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. Field Crops Res., 91:131-148, 2005.
- SECCO, D. Estados de compactação de dois latossolos e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas. (Tese de Doutorado) Santa Maria, 110p. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.
- SEQUINATTO, L. Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação (Tese de Doutorado) Porto Alegre, 158p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- SILVA, F.A.S. & AZEVEDO, C.A.V. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. Pesq. Agropec. Bras., 42:1159-1167, 2007.
- STONE, L.R.; TEARE, I.D.; MICKELL, C.D. & MAYAKI, W.C. Soybean root development and soil water depletion. Agron. J., 68:670-680, 1976.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (Zea Mays) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo, 25:725-730, 2001
- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 28:1023-1031, 2004.

TULLBERG, J.N., YULE, D.F. & MCGARRY, D. Controlled traffic farming e from research to adoption in Australia. *Soil Tillage Res.* 97:272-281, 2007.

ZOU, C.; PENFOLD, C.; SANDS, R.; MISRA, R.K. & HUDSON, I. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant Soil*, 236:105-115, 2001.

WOLKOWSKI, R.P. Corn growth response to K fertilization on three compacted soils. *Soil Till. Res.*, 21: 287-298,1991.



## 7 CAPITULO III

### **Sistema de tráfego controlado em uma área comercial sob SPD no centro-oeste do Paraná**

#### **Resumo**

Ordenar o tráfego de máquinas agrícolas (tráfego controlado) é uma forma eficiente de diminuir as perdas de produtividade devido a compactação, melhorar o rendimento operacional de máquinas e equipamentos, diminuir a fadiga de operadores, e aprimorar de maneira geral toda a produção agrícola. Outra vantagem deste sistema é que em locais com a ausência do tráfego o solo tem sua estrutura preservada favorecendo a infiltração de água no solo. Quando esta prática for associada com outras práticas conservacionistas tais como semeadura em contorno e sistema plantio direto (SPD) o controle das perdas de água será aumentado. No Brasil, o número de propriedades no Sul do Brasil que utilizam esta prática ainda é restrito. Neste estudo foi acompanhado uma propriedade no centro-oeste no Paraná, que implantou através de adaptações em máquinas e equipamentos um sistema que permite o controle de tráfego parcial. O solo do local é classificado como sendo um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa. A altitude do local é de 633 metros e o clima subtropical Cfb, com temperatura média anual é de 19°C e precipitação anual oscilando entre 1.100 até 1.400 mm. A cultura investigada foi a da soja durante o verão. Os tratamentos investigados foram: (a) Sem tráfego de pneus, tratamento de referência (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do trator (TT) e (c) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do conjunto trator-semeadora (TM). O delineamento experimental foi o de blocos inteiramente casualizados com três repetições. Foram determinadas as propriedades físicas do solo (densidade, porosidade, resistência a penetração e infiltração), desenvolvimento do sistema radicular, produção de massa seca, componentes de rendimento e produtividade da cultura. Os tratamentos não influenciaram as propriedades físicas do solo, desenvolvimento do sistema radicular e a produção de massa seca da soja. A qualidade do manejo do solo, com rotação de cultura e culturas de cobertura, com elevado aporte de resíduos ao solo, equilibrada adubação, evitaram o efeito negativo do tráfego de máquinas. Assim, os valores da RP se mantiveram independente dos tratamentos, abaixo dos considerados como críticos não afetando o desenvolvimento do sistema radicular. A produtividade de grãos de soja não sofreu influência do tráfego de máquinas, sob condições favoráveis de precipitação.

**Palavra chave:** Plantio direto, compactação do solo, sistema radicular, produtividade da soja.



## 7.1 Introdução

A compactação é o principal desafio de lavouras mecanizadas. Entre as opções de mitigação de seus efeitos está o planejamento das máquinas agrícolas e do seu tráfego nos talhões, evitando que os problemas advindos do tráfego de máquinas, a compactação do solo, ocorra de maneira aleatória dentro da área ( Chamem et al., 2003)

Atualmente o mercado de máquinas e equipamentos agrícolas possui uma grande variedade de modelos a disposição dos produtores, possibilitando assim fazer o planejamento com combinações de características, visando maior eficiência na realização das operações de manejo nas culturas. As máquinas que possuem maior facilidade de variações nas suas configurações são os tratores, aonde é possível alterar a bitola dos pneus traseiros e alterar o peso total. Para os pulverizadores, as variações podem ser feitas alterando a largura da barra de aplicação. Nas semeadoras o espaçamento e o número de linhas são os itens que mais facilmente são alterados.

Nos tratores agrícolas o peso o sistema de tração é a característica que possui a maior possibilidade de mudanças e adaptações. O peso é facilmente alterado com a colocação ou a retirada de pesos adicionais através da lastragem, porém com o cuidado de manter a relação peso/potencial na faixa de 10-20% de patinamento (Wulfsohn et al., 1988; Corrêa et al., 1998). Outra forma de alteração é referente ao tipo de pneus utilizados, pressão de insuflação e ainda o ajuste da bitola dos pneus traseiros. Estas mudanças são importantes, pois segundo Soane et al. (1981) a pressão da insuflagem, o tamanho do pneu e a resistência da carcaça controlam a distribuição de força sobre a área de contato com o solo, alterando assim o nível de compactação no solo.

Raghavan et al. (1976) investigando a compactação causada por pneus agrícolas de tamanhos diferentes, identificaram a vantagem da utilização de pneus mais largos, a fim de distribuir a carga sobre uma área maior, resultando em menor compactação. De acordo com Soehne (1958), o efeito de compressão do pneu do trator no solo, tende a concentrar-se na linha central do tráfego.

Outro fator ajustável é a bitola dos pneus traseiros, que é definida como a distância entre o centro do pneu até o centro do pneu do lado oposto. O seu ajuste é fundamental e o de maior complexidade para a completa instalação do sistema de tráfego controlado. A coincidência entre a bitola das máquinas envolvidas, com a qual se definem as linhas de

tráfego do sistema é o princípio básico do tráfego controlado. A bitola mais utilizada é de 3 m ou seus múltiplos, uma vez que para a instalação do sistema as máquinas existentes no mercado não necessitam de muitas adaptações. Porém esta medida não é definitiva, podendo ser alterada em função das máquinas disponíveis pelo produtor.

A semeadora também possui papel fundamental na implantação do sistema de tráfego controlado, pois o espaçamento e o número de linhas que ela possui serão utilizados no planejamento do sistema. No caso da cultura do milho, o tamanho da semeadora deve ser coincidente com o tamanho da plataforma de corte da colhedora, tornando este ajuste fundamental para o sistema. A largura de trabalho novamente vai depender da associação com as diferentes máquinas envolvidas no processo.

O pulverizador é a máquina que apresenta maior possibilidade de mudanças na sua largura de trabalho. Como a variação da bitola é bastante difícil, a alteração acontece na barra da aplicação. O mais utilizado é barra com 27 m de largura, porém em alguns casos, pode ser utilizadas barras com 24 m. Esta variação é possível, isolando a última sessão da barra, possibilitando assim que o sistema fique completamente ajustado. A linha de tráfego do pulverizador pode ser utilizada como balizadora da chamada de “*tramline*” na qual todas as máquinas devem trafegar (Bochtis et al., 2010).

O sistema de tráfego controlado apresenta como uma das principais vantagens a menor distância percorrida dentro da área, uma vez que o trajeto pode ser planejado visando esta melhoria, a possibilidade do uso de sistemas auxiliares de orientação, que contribuem diminuindo a fadiga e melhorando a execução das intervenções pelos operadores (Han et al., 2004). Além disso, o uso do sistema possibilita menor sobreposição nas operações de pulverização (Dunn et al., 2006).

O objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo de caso com a descrição, e o processo de implementação do sistema de tráfego controlado parcial de máquinas em uma propriedade rural no Estado do Paraná, que vem utilizando o sistema desde o ano de 2010 associando-o ao sistema plantio direto (SPD), também avaliar as modificações imposta pelo tráfego de máquinas no solo, o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da cultura da soja.

## 7.2 Material e Métodos

### 7.2.1 Localização do experimento

A área em estudo se localiza na cidade de Céu Azul, centro-oeste do Estado do Paraná onde está localizada a empresa agrícola AgroTasca, integrante do projeto MAS (Manejo Avançado Stara). Na sua área comercial, existe um talhão com 18,7 hectares, que esta situado sob as coordenadas geográficas com latitude  $-25^{\circ} 6' 52.1294''$  S e longitude  $-53^{\circ} 50' 22.6149''$  O, seguindo o Datum WGS 1984, situada a 633 m de altitude (Figura 20). O município esta localizado na região do planalto paleozoico, com precipitação média durante o ano de 1.100 até 1.500 mm distribuição de chuvas regulares durante o ano todo. O clima é subtropical úmido mesotérmico, com verões quentes e geadas pouco frequentes no inverno sendo classificada como Cfb segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de  $19^{\circ}\text{C}$ . O solo do local é classificado segundo a Embrapa (2006) como sendo um Latossolo Vermelho, com elevado teor de argila ( $>60\%$ ).



**Figura 20** – Talhão do experimento de tráfego controlado, em destaque o posicionamento dos blocos. Céu Azul, PR.

### 7.2.2 Histórico de manejo Sistema de tráfego controlado parcial

O sistema de tráfego controlado ainda é incipiente no Brasil, sendo necessário varias adaptações nas máquinas agrícolas, sendo que em muitos casos, sua implementação é realizada de forma parcial em um primeiro momento. Em muitos casos, os produtores optam por fazer os ajustes nas máquinas envolvidas na cultura com maior retorno econômico.

A instalação do sistema de controle de tráfego foi iniciado no ano agrícola 2011/12 com o ajuste de bitolas das máquinas envolvidas no manejo desta área. A primeira cultura semeada foi a soja (*Glycine max*), cultivar Nidera 5909 com 12 plantas por metro linear e com espaçamento entre linhas de 0,70 m. A adubação utilizada foi com cloreto de potássio (KCl) na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura e adubação fosfatada (SFS) utilizada foi 250 kg ha<sup>-1</sup>. Neste primeiro ano, a área sofreu a pressão de uma passada de trator (semeadora) e sete passes de pulverizador. A produtividade sofreu reduções em virtude de eventos climáticos de estiagem na fase final do ciclo e chuva de granizo logo após a emergência das plantas, produzindo 3.300 kg ha<sup>-1</sup>.

Na safra de inverno do mesmo ano 2012, logo após a colheita da cultura da soja foi feito a semeadura da aveia (*Avena strigosa* L.) no mês de abril com espaçamento de 0,17 m entre linhas. A cultivar utilizada foi a IAPAR 126, sendo utilizados 75 kg ha<sup>-1</sup> de sementes. A adubação foi de 120 kg ha<sup>-1</sup> (10-15-15), ainda foram aplicados 1.600 kg ha<sup>-1</sup> de calcário. Nesta safra a cultura da aveia foi utilizada como cobertura do solo e ciclagem de nutrientes. O trator utilizado para a semeadora não seguiu os rastros do primeiro cultivo após e o pulverizador transitou por quatro vezes dentro da área, no mesmo rastro das operações da safra anterior. Para a semeadura de inverno, somente o tráfego do trator segue as linhas pré definidas anteriormente, o tráfego do trator para a semeadura é realizado de maneira independente da cultura de verão.

O milho (*Zea mays* L.) foi a cultura utilizada no ano agrícola 2012/2013, entrando na rotação de cultura. O espaçamento utilizado foi o de 0,70 m e foi realizado com uma semeadora de nove linhas, totalizando 6,30 m de largura de trabalho. O híbrido utilizado foi o Pionner 30F53 com 4,5 plantas por metro linear. A adubação foi feita antecipadamente com 75 kg ha<sup>-1</sup> de KCl em superfície, anteriormente, no momento da semeadura foram utilizados 500 kg ha<sup>-1</sup> da formula 10-15-15, incorporada na linha. No momento em que o milho estava com 3 e 7 folhas, foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio em cada estágio vegetativo. A produção foi de 13.620 kg ha<sup>-1</sup>, e foram realizados um passe de trator e sete passadas do pulverizador nas mesmas linhas utilizadas na cultura da safra de verão do ano anterior.

No inverno do ano de 2013, novamente foi utilizada a aveia como cultura de cobertura com o manejo semelhante ao da safra de inverno anteriormente. A semeadora utilizada possuía 21 linhas com espaçamento de 0,17 m, totalizando 3,5 m de largura total. A cultivar utilizada foi a IAPAR 126 com 75 kg há<sup>-1</sup>. Nesta safra a adubação utilizada foi realizada a lanço sendo 120 kg há<sup>-1</sup> de MAP e 60 kg há<sup>-1</sup> de KCl. Ainda foram utilizados 1.200 kg há<sup>-1</sup> de gesso. As três aplicações foram realizadas a lanço em superfície, com ferramentas de agricultura de precisão. No momento da semeadura foi feita o uso de 100 kg há<sup>-1</sup> de calcário na linha de semeadura. Novamente o tráfego de trator não seguiu as linhas projetadas para a cultura de verão, e o pulverizador trafegou pela área durante sete vezes.

Na safra agrícola 2013/2014 foi semeada a cultura da soja, cultivar TMG 7262 com 14 plantas por metro linear e espaçada 0,70 m entre fileiras, para isso utilizou-se a mesma semeadora utilizada na cultura do milho, com largura de trabalho totalizando 6,30 m. A adubação utilizada na área foi de 80 kg há<sup>-1</sup> KCl e 100 kg há<sup>-1</sup> de adubação formulada 8-40-00 (NPK). Neste cultivo o trator seguiu a mesma linha de tráfego com uma passada, já o pulverizador foi utilizado em cinco operações.

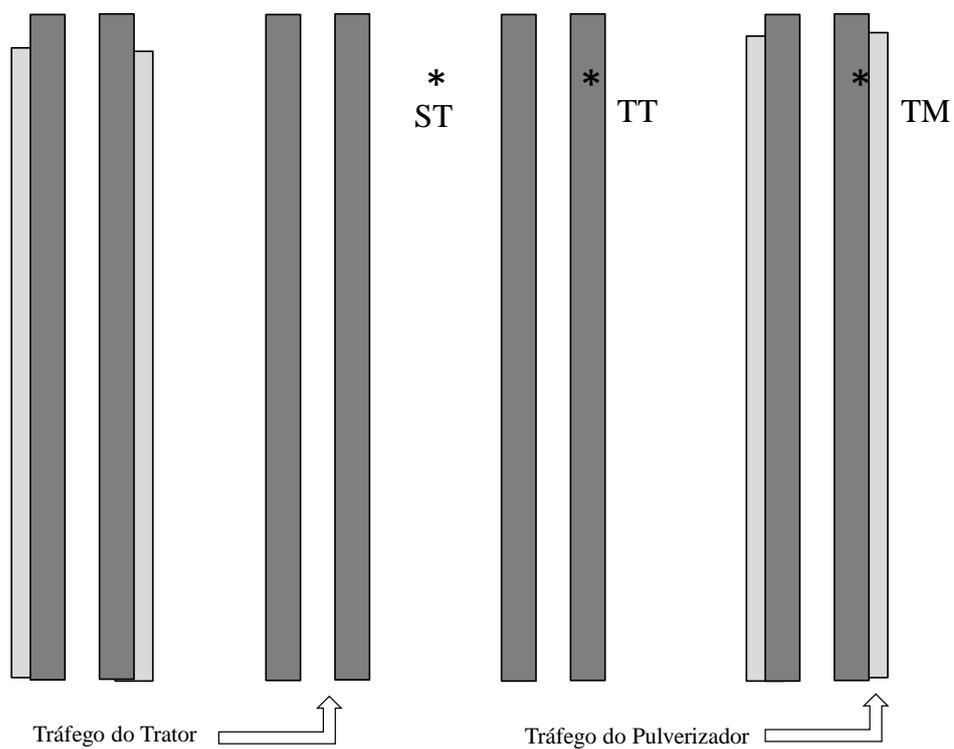
Até o momento, a área possui acumuladas três passagens de trator no mesmo local, nas linhas planejadas previamente. Na semeadura da cultura de inverno, o trator não segue as linhas planejadas para a cultura de verão, isso acontece devido ao tipo de semeadora utilizada no inverno, ser diferente da semeadora utilizada nas safras de verão. O pulverizador foi utilizado 23 vezes durante as cinco safras agrícolas, todo o tráfego foi realizado nas mesmas linhas.

Diferentemente do modelo tradicional, o pulverizador atua no mesmo sentido de semeadura na cultura da soja, isso acaba gerando uma configuração de tráfego que em cada quatro passadas de semeadora, ocorre a coincidência com uma passada do pulverizador, formando nesta linha de tráfego a área com o máximo de trânsito dentro da lavoura.

Outra mudança realizada visando a implementação do sistema, aconteceu na semeadora, que originalmente possui 11 linhas com espaçamento de 0,45 m. Para conseguir o maior controle do tráfego, o produtor optou pelo aumento do espaçamento entre as linhas e com isso foi necessário a retirada de duas linhas de semeadura. Desta forma em ambas as culturas que são utilizadas no período de verão, o espaçamento entre linhas é igual, de 0,70m. O aumento do espaçamento entre linhas na cultura da soja, que na região é semeada com espaçamento de 0,45 m pode possibilitar um melhor manejo fitossanitário e possibilitar a implantação do sistema de tráfego dentro da área.

### 7.2.3 Tratamentos

Os tratamentos investigados foram: (a) Sem tráfego de pneus (tratamento de referência) (ST); (b) Tráfego com passagem de pneus do trator (TT) e (c) Tráfego máximo, acumulando passagens de pneus do pulverizador e do conjunto trator-semeadora (TM). Os tratamentos e os locais das determinações são apresentados de forma esquemática para facilitar o entendimento (Figura 21).



**Figura 21** – Representação simplificada dos tratamentos e dos locais das determinações do estudo de caso. Céu Azul (PR).

### 7.2.4 Máquinas utilizadas

#### 7.2.4.1 Trator

O trator utilizado na propriedade é um *CASE MAGNUM 235*, rodado duplo, com pneus dianteiros 20.8-38 com 0,50 m de largura e pneus traseiro duplos 19.5-24 com 0,45 m de largura. Esta configuração possibilita que a bitola dos pneus dianteiros seja de 1,90 m. A bitola dos pneus traseiros internos é igual a parte da frente, ou seja, 1,90 m na parte interna e nos pneus externos esta bitola é de 3,20 m. O trator é equipado com piloto automático, *AFS Guide*, original da mesma marca, atuando diretamente no sistema hidráulico. O monitor utilizado em todo o processo de semeadura foi do modelo *Topper S 3*, da marca Stara.

#### 7.2.4.2 Colhedora

A máquina utilizada na colheita de grãos é uma *CASE AXIAL FLOW 2388*, com pneus dianteiros duplos 20.8-38 e com a bitola frontal de 3,10 m nos pneus internos e de 4,50 m nos pneus externos, ambos com largura de 0,50 m. Os pneus traseiros são 19.5-24 com largura de 0,45 m e bitola de 3,10m. A máquina esta equipada com o sistema de agricultura de precisão original de fábrica. As plataformas de corte utilizadas são de 7,50 m na cultura da soja e de 6,3 m ou nove linhas para a cultura do milho.

#### 7.2.4.3 Semeadora

As operações de semeadura das culturas de verão (soja e milho) foram realizadas com a mesma máquina (*Victoria Control 5400*, Stara), com nove linhas, espaçamento de 0,70 m, totalizando uma largura de trabalho de 6,30 m. O peso total é de 6.600 kg e os tanques de depósito de sementes tem a capacidade de trabalho de 450 kg para sementes e de 2.000 kg para o adubo. Nas operações de semeadura utilizaram-se elementos de abertura de sulco para a deposição de adubos tipo haste (botinhas) com profundidade de atuação variando entre 0,10 – 0,15 m.

#### 7.2.4.4 Pulverizador Autopropelido

O pulverizador utilizado foi o *Gladiador 2300 (STARA)*, motor com 100 kW (135 cv) e peso total de embarque de 7.200 kg, distribuídos em 40% na parte frontal e 60% na parte traseira. Os pneus utilizados são do modelo 12.4-36, com largura de 0,30 m e bitola de 2,80

m. A barra de aplicação é de 25 m e possui desligamento de sessão a cada 0,50 m. Ele vem equipado com todo o sistema de agricultura de precisão direto da fábrica. O monitor de operação é do modelo *Topper 4500* e com o sistema de dados possíveis de utilizar o RTK.

#### *7.2.4.5 Sistema de posicionamento geográfico*

Na propriedade foi utilizado um sistema de correção de sinal RTK (*Real Time Kinematic*). O sinal de correção possui uma estação Base *RTK Topcon HiPer AG®* (base fixa) que envia um sinal de rádio UHF para um módulo de rádio acoplado ao receptor GNSS *AGI-3®*. O sistema de posicionamento possibilitou trabalhar com um erro inferior a 0,025 m.

### 7.2.4 Propriedades Físicas do Solo

#### *7.2.4.1 Densidade, Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total*

As primeiras análises foram realizadas antes da semeadura da soja, em outubro de 2013. Para tanto, utilizou-se anéis de aço com volume conhecidos para determinar as propriedades físicas do solo: densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), e porosidade total (Pt), através do método da mesa de tensão, descrito por Embrapa (1979) nas profundidades de 00-0,05 ; 0,05-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 m, com cinco repetições por tratamentos em cada bloco. A segunda época de avaliação foi realizada no pleno florescimento, e por fim uma determinação após a colheita da cultura. As amostras foram coletadas em uma distância regulares de 5 m dentro de cada bloco.

#### *7.2.4.2 Resistência a penetração (RP)*

Para a determinação da RP foi utilizado um penetrômetro *Geo-Referenciado PNT-2000*, com ponta cônica de 30° e com área do cone de 129 mm<sup>2</sup> segundo normas ASAE (313.3). As leituras foram realizadas a cada 0,01 m de profundidade até uma profundidade máxima de 0,40 m. As determinações foram realizadas nas mesmas épocas dos demais atributos físicos, com 10 repetições em cada tratamento na linha central do tráfego das máquinas. No momento do pleno florescimento foram feitas as leituras na linha central de

tráfego e lateralmente a cada 0,20 m, de forma a formar um transecto de RP em cada tratamento.

Simultaneamente as avaliações de RP foi coletada uma amostra de solo com o auxílio de um trado calador e armazenadas em latas hermeticamente fechadas para a determinação da umidade gravimétrica do solo, nas profundidades de 0-0,1; 0,1-0,3m de profundidade.

#### *7.2.4.5 Determinação da massa seca*

Para determinação da massa seca da parte aérea, no momento do pleno florescimento foi feita o corte de plantas rente ao solo, em uma área de 1 m<sup>2</sup>. Após o corte da parte aérea, as amostras foram secas em uma estufa com circulação de ar forçado, com temperatura média de 65°C até atingir o peso constante. Maiores informações sobre a metodologia utilizada são encontrados no item 6.2.2 (Capítulo II).

#### *7.2.4.6 Avaliação do sistema radicular*

A determinação do sistema radicular da cultura foi realizada no momento do pleno florescimento, com três repetições em cada tratamento, através de imagens fotográficas. A descrição completa desta metodologia é apresentada no item 4.8 (capítulo I).

#### *7.2.5 Produtividade de grãos*

Para determinação da produtividade foi realizada a colheita de forma manual em cinco pontos por bloco, totalizando quinze repetições em cada tratamento. Nestes locais foram colhida 1 m<sup>2</sup> na cultura da soja, em laboratório procedeu-se a debulha manual e determinado os componentes de rendimento, posteriormente ajustada com umidade de referencias de 13%.

#### *7.2.6 Delineamento Experimental*

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados (40 X 40 m), com três repetições totalizando uma área experimental de 4.800 m<sup>2</sup>. Os dados foram submetidos à análise de variância, com uso do programa computacional ASSISTAT 7.6 beta (Silva & Azevedo, 2009) sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

## **7.3 Resultados e Discussão**

### 7.3.1 Propriedades Físicas

#### *7.3.1.1 Determinação realizada após semeadura da soja*

Os resultados obtidos logo após a semeadura da soja não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos investigados (Quadro 7). Nesta avaliação, os valores de densidade são considerados baixos e quando associado com os elevados valores de macroporosidade, todos acima do considerado crítico por Reichert et al. (2004), fornecem condições favoráveis para o desenvolvimento da cultura. O solo não apresentava nem um tipo de impedimento físico para o desenvolvimento do sistema radicular.

**Quadro 7** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), após a semeadura da soja Latossolo Vermelho. Céu Azul, PR.

Tratamentos	Ds	Ma	Mi	Pt
	Mg m <sup>-3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
		0,0 – 0,05 m		
ST	1,13 <sup>(1)</sup>	0,13	0,37	0,50
TT	1,15	0,14	0,38	0,52
TM	1,24	0,15	0,43	0,58
Teste F	1,71 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	1,23 <sup>ns</sup>	1,32 <sup>ns</sup>
CV (%)	7,17	29,01	13,73	8,67
		0,05 – 0,10 m		
ST	1,15	0,13	0,41	0,54
TT	1,17	0,12	0,37	0,49
TM	1,21	0,12	0,40	0,53
Teste F	1,25 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	1,03 <sup>ns</sup>	1,86 <sup>ns</sup>
CV (%)	8,91	28,76	14,65	12,45
		0,1 – 0,20 m		
ST	1,19	0,11	0,44	0,55
TT	1,16	0,10	0,45	0,55
TM	1,17	0,12	0,47	0,59
Teste F	0,35 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	1,18 <sup>ns</sup>
CV (%)	5,24	22,50	12,07	8,16
		0,20 – 0,30 m		
ST	1,12	0,13	0,44	0,57
TT	1,13	0,15	0,33	0,48
TM	1,20	0,12	0,44	0,46
Teste F	0,71 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>
CV (%)	10,33	26,27	26,21	16,58

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TT= área com tráfego de pneus do trator, com três (3) passadas de trator acumulas, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido com 23 passadas, mais área com tráfego de pneus do trator, com três (3) passadas. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna e profundidade, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

O que se pode observar é que a medida que se aumenta a profundidade, os valores de Ds sofrem um pequeno aumento, atribuído ao processo natural do solo de adensamento. Uma possível explicação para estes valores baixos de Ds e elevados de Ma, quando comparados ao experimento na cidade de Não Me Toque, discutido no capítulo I, é o histórico da área onde esta sendo conduzido este experimento.

Com um histórico recente da adoção e adaptação do sistema de tráfego disciplinado, o manejo da área vem sendo conduzido com a utilização de tecnologia avançada, em todos os setores, desde as adubações equilibradas de fertilizantes químicos utilizados, elevadas quantidades de inoculante, para a semeadura da soja, as cultivares e híbridos utilizados possuem elevado potencial produtivos, aumento progressivo dos teores de MOS e fertilidade

e a presença constante de cobertura vegetal fazem com que as cargas exercidas pelas máquinas no solo, fazem com que os efeitos deletérios na estrutura do solo exercidos pelas cargas das máquinas no solo sejam minimizados. A utilização da aveia como cultura de cobertura acaba por favorecendo a manutenção da qualidade do solo, principalmente das propriedades físicas.

Neste sentido Dao (1996) e Silva et al. (2000), observaram que a presença de resíduos na superfície do solo atua de forma a reduzir os efeitos e a compactação superficial do solo. Condição esta que segundo relato dos produtores, vem sendo observado ao longo de mais de quinze anos, com crescentes aportes de resíduos culturais na superfície do solo. Outro fator que atua na redução da compactação foi observado por Nicoloso et al. (2008) que atribuíram a presença de plantas do cobertura com sistema radicular agressivo, como é o caso da aveia, uma melhoria nos atributos físicos de um Latossolo com elevado teor de argila.

#### *7.3.2.2 Determinação realizada no florescimento da soja*

No momento do pleno florescimento da cultura novamente os resultados observados não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos para as variáveis de densidade e microporosidade. Já para os parâmetros de macroporosidade e porosidade total observou-se diferença entre os tratamentos na camada superficial até 0,05m (Quadro 8).

**Quadro 8** – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), niflorescimento da soja Latossolo Vermelho. Céu Azul, PR.

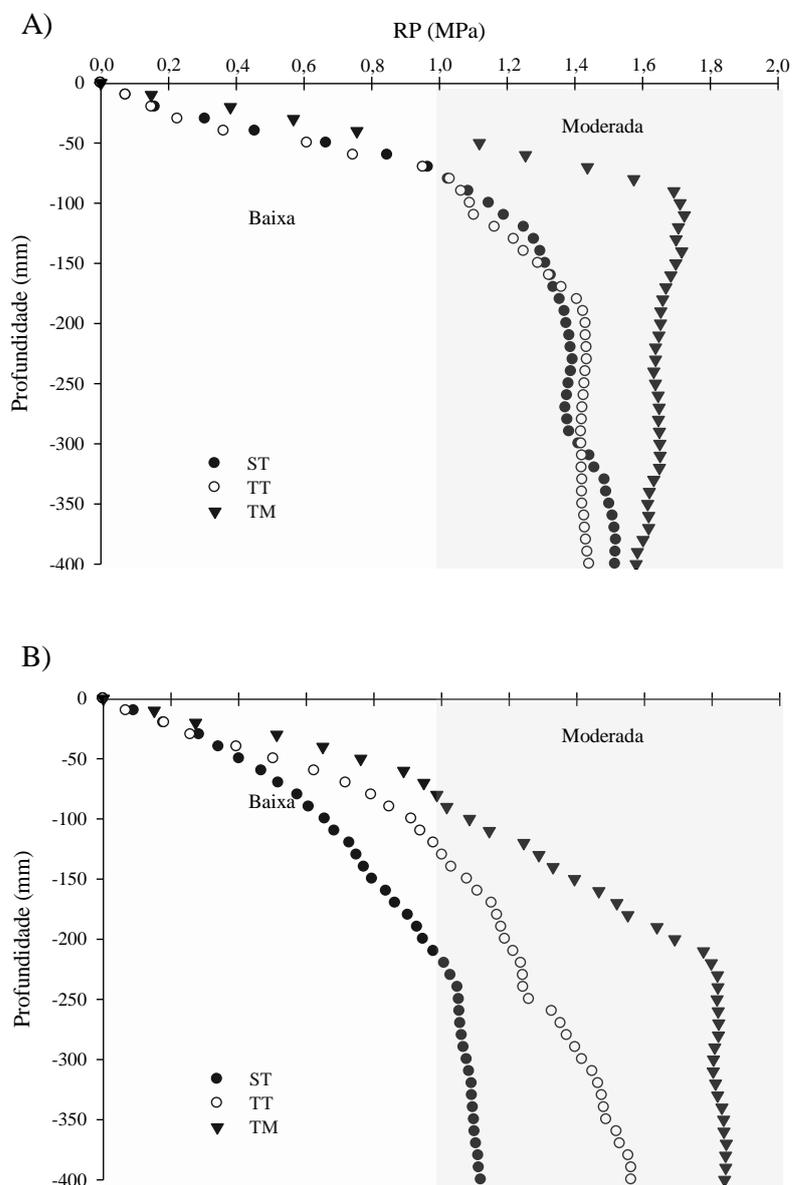
Tratamentos	Ds	Ma	Mi	Pt
	Mg m <sup>-3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
	0,0 – 0,05 m			
ST	1,24 <sup>(1)</sup>	0,12 a	0,49	0,61 a
TT	1,32	0,07 b	0,50	0,57 ab
TM	1,24	0,08 b	0,47	0,55 b
Teste F	1,78 <sup>ns</sup>	7,52**	2,48 <sup>ns</sup>	2,32**
CV (%)	4,38	18,82	7,08	4,07
	0,05 – 0,10 m			
ST	1,31	0,09	0,50	0,59
TT	1,28	0,08	0,48	0,46
TM	1,21	0,06	0,47	0,53
Teste F	1,61 <sup>ns</sup>	3,34 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>	1,65 <sup>ns</sup>
CV (%)	6,93	25,61	10,30	8,44
	0,1 – 0,20 m			
ST	1,21	0,09	0,46	0,55
TT	1,18	0,09	0,46	0,45
TM	1,18	0,08	0,47	0,55
Teste F	0,14 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>
CV (%)	11,99	19,02	10,23	8,48
	0,20 – 0,30 m			
ST	1,13	0,10	0,45	0,55
TT	1,10	0,07	0,43	0,51
TM	1,29	0,07	0,47	0,54
Teste F	5,97*	1,16 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>
CV (%)	8,36	44,57	19,83	13,38

Onde: ST= área livre de tráfego de pneus, TT= área com tráfego de pneus do trator, com três (3) passadas de trator acumuladas, TM= área com tráfego de pneus do pulverizador autopropelido com 25 passadas acumuladas, mais área com tráfego de pneus do trator, com três (3) passadas. <sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas, na mesma coluna e profundidade, diferem pelo teste de Tukey. <sup>ns</sup> Teste F não significativo. \* Teste F significativo (p < 0,05).

O tratamento ST foi o único que apresentou valores acima do considerado crítico para este parâmetro que é de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> proposto por Taylor et al. (1966). Outro parâmetro que apresentou diferença entre os tratamentos foi a Pt, que influenciada pela diferença nos macroporos, apresentou o mesmo comportamento, com o maior valor no tratamento ST, seguido pelos tratamentos TT e TM.

## Resistência a Penetração (RP)

Após a semeadura da soja foi realizada a primeira determinação da RP. A maior RP foi encontrada no tratamento TM, onde ocorreu a sobreposição do tráfego do pulverizador sobre o tráfego do trator (Figura 22 A).



**Figura 22** – Resistência a Penetração (RP) na caracterização inicial após a semeadura da soja (A) e no momento do pleno florescimento da cultura (B), classificada de acordo com Arshad et al. (1996). Onde: ST = Sem tráfego, TT = Tráfego do trator e TM = Tráfego máximo. Céu Azul- PR.

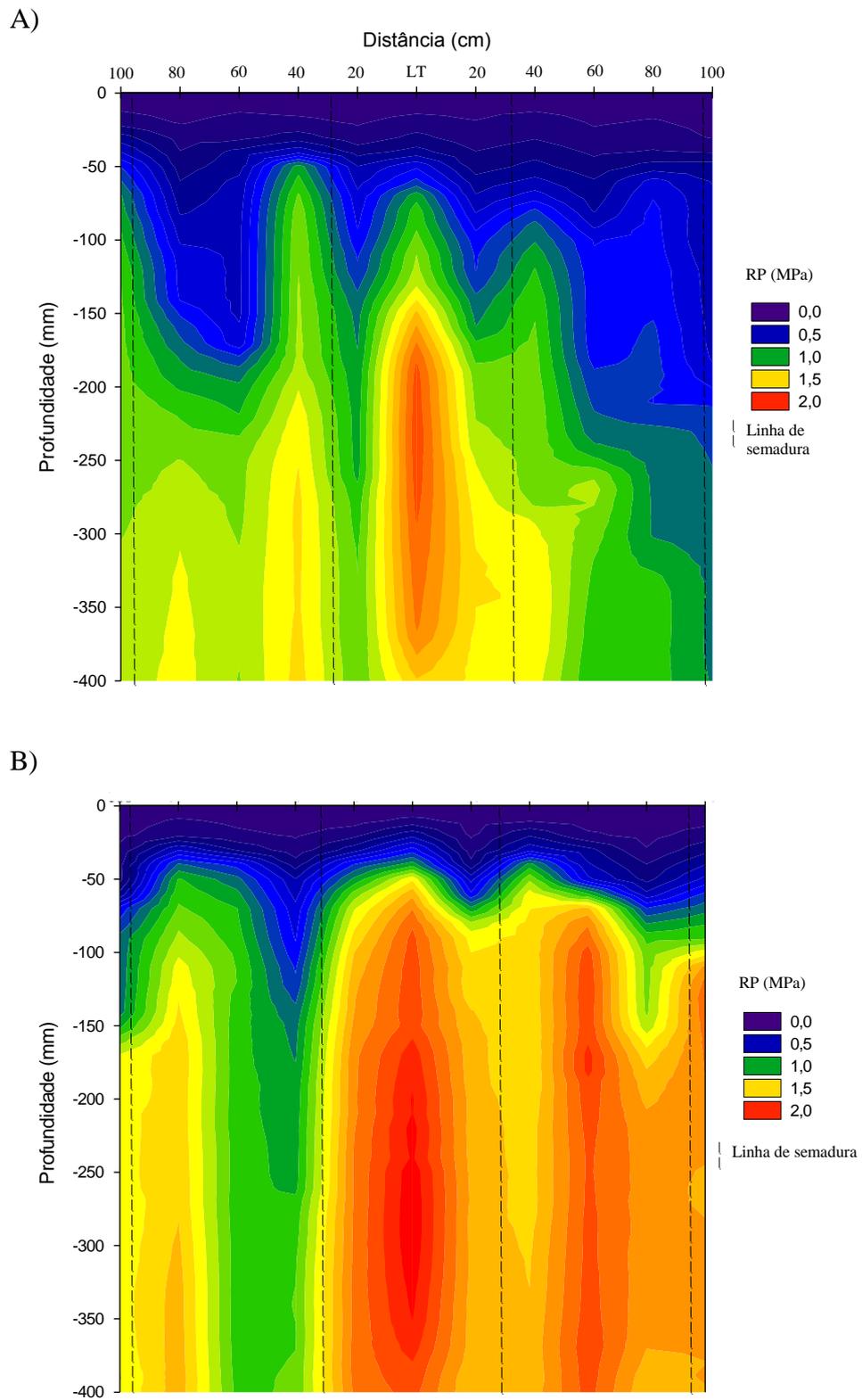
Em todos os tratamentos investigados a RP não atingiu o limite crítico proposto por Tormena et al. (1998). A RP foi classificada como sendo moderada pela classificação de Arshad et al. (1996). Este resultado pode ser explicado pelo manejo realizado na área, em que o constante aporte de cobertura vegetal, presença de sistema radicular de culturas diferentes,

melhoria na estrutura do solo, evitando assim o efeito deletério do tráfego de máquinas. No momento da execução das leituras de RP a umidade do solo era de  $34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Para a soja, de acordo com a Embrapa Soja, considera-se para os Latossolos roxos, valores de resistência em torno de 2,5 MPa (solo na consistência friável). Portanto, os valores encontrados em nosso trabalho foram classificados como baixos para serem restritivos ao crescimento radicular. Resistências em torno de 3,5 a 6,5 MPa, aparentemente, são as mais corretas para considerar que um solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico.

No momento do pleno florescimento novamente foi realizado as determinações de RP em todos os tratamentos investigados (Figura 22 B). O comportamento desta determinação foi semelhante a anterior, não atingindo a RP limitante ao desenvolvimento do sistema radicular e sendo classificada segundo Arshad et al. (1996) como moderada. Novamente o tratamento TM apresentou a maior RP, com um incremento em relação ao tratamento ST foi de 80% a partir da profundidade de 0,20 m. Um fato que pode explicar os baixos valores para a RP, é a umidade do solo elevada, que no momento da realização dos testes encontrava-se com  $33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Quando se utilizou um transecto para avaliação da RP foi possível determinar um aumento da RP na linha de tráfego em ambas as máquinas. O tráfego do trator (Figura 23 A) gerou um aumento da RP na profundidade de 0,15 m, ressaltando que este aumento não é suficiente para causar reduções no desenvolvimento do sistema radicular. Partindo do centro da linha do tráfego é possível observar um local este que apresenta redução na RP pela presença da linha de semeadura, causado pelo uso de sulcadores e pelo crescimento do sistema radicular da cultura. No tratamento TM observa-se um aumento da RP aonde ocorre a linha de tráfego em profundidade a lateralmente (Figura 23 B).



**Figura 23** – Resistência a Penetração (RP) após a semeadura da soja (A) e no pleno florescimento da soja (B), espaçado equidistante em relação a linha de tráfego do trator e linhas de semeadura Céu Azul- PR.

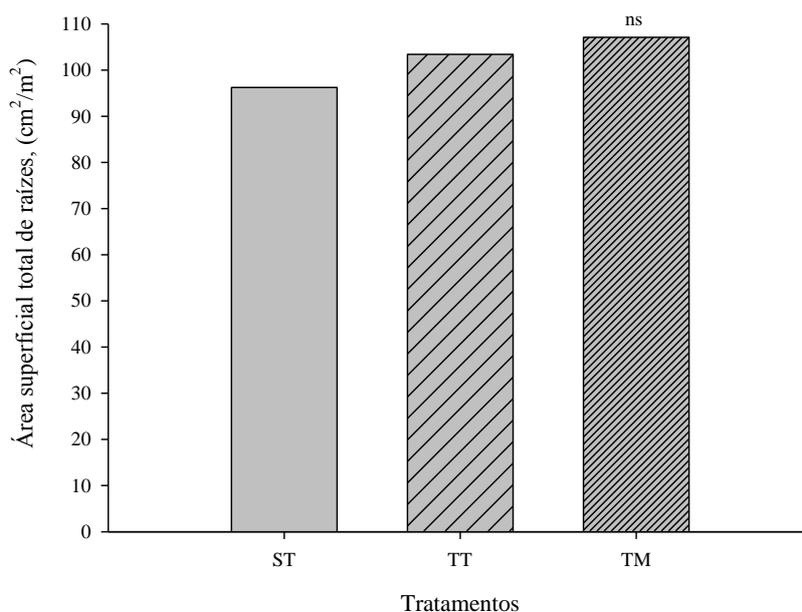
De acordo com Reichert et al. (2010), as pressões aplicadas sobre a superfície do solo são distribuídas ao longo do perfil, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, de acordo com as características físicas do solo. Portanto, destaca-se que o aumento do tráfego causou menor efeito a medida que houve um afastamento do local, assim ficou evidenciado que a compactação afeta o solo mais em profundidade do que lateralmente.

A concentração do aumento da RP no tratamento aonde existe o tráfego máximo, é mais dispersa, mais aleatória quando comparada com o tráfego de trator (Figura 23), uma vez que as distribuições das pressões decorrentes da carga mecânica (tráfego de máquinas) aplicada ao solo e a compressibilidade dele determinam o tipo e a intensidade da deformação do solo (Soane et al., 1981; Horn et al., 1995). Esses fatores são os responsáveis pelos diferentes níveis de compactação e pela distribuição espacial e em profundidade (Alakukku et al., 2003).

Ambos os tratamentos (TM e TT) causaram o aumento da RP em profundidade, especialmente na linha de trânsito, mesmo que este aumento não seja limitante ao desenvolvimento da cultura a sua localização em profundidade, maior que 0,15 m, deve ser a maior preocupação, visto que a redução ou eliminação da compactação no subsolo (profundidade > 0,20m) demanda altos custos para a sua solução, bem como implica na redução do aproveitamento de nutrientes do solo (Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003).

#### *7.3.2.5 Desenvolvimento do sistema radicular*

A área total do sistema radicular da cultura da soja após a aplicação dos tratamentos não apresentou diferença estatística (Figura 24). Diferentemente aos resultados obtidos no experimento semelhante realizado no RS, descrito no capítulo II. Porém, neste experimento, as condições de solo sofreram modificações imposta pelo tráfego de máquinas, condição esta que não foi evidenciada no presente trabalho. A maior produção total de raízes foi encontrada no tratamento TM, seguido TT e ST.



**Figura 24** – Distribuição do volume de raízes de soja, no perfil do solo, em função dos tratamentos ST = Sem tráfego, TP = tráfego do pulverizador, TT = tráfego do trator e TM tráfego máximo. Céu Azul- PR.

Este resultado está associado às condições físicas do solo (Quadro 8), que não apresentou restrições ao desenvolvimento do sistema radicular. Neste sentido Torres & Saraiva (1999) afirmam que a quantidade total de raízes no perfil do solo, algumas vezes, pode ser semelhante, independentemente das condições de solo verificadas nas diferentes profundidades, evidenciando assim a característica das raízes de compensar as restrições de impedimento mecânico, tentando suprir as necessidades fisiológicas da planta. As condições de manejo e práticas culturais como época de semeadura, espaçamento e população de plantas, afetam a distribuição das raízes de soja no solo. Culturas com espaçamentos reduzidos entre as fileiras tendem a reduzir o desenvolvimento do sistema radicular, situação oposta a encontrada neste trabalho.

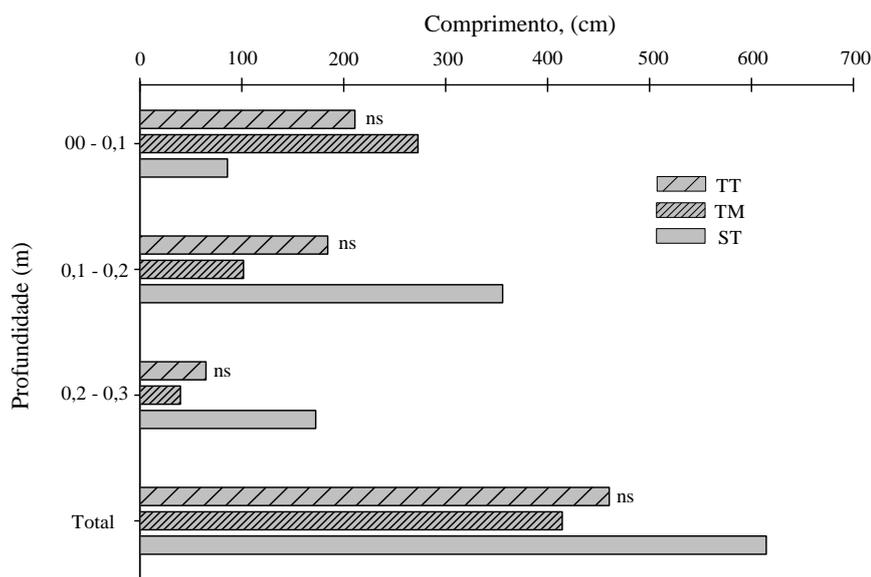
A presença de macroporos é fundamental para o desenvolvimento do sistema radicular, uma vez que o crescimento das raízes é feito preferencialmente pelos macroporos e/ou bioporos estabilizados Vepraskas (1994) e no caso dos Latossolos a capacidade do plantio direto proporcionar, por longos períodos de tempo, boa distribuição do sistema radicular das espécies cultivadas, depende muito da formação e da preservação dos bioporos (Torres e Saraiva, 1999).

Nos trabalhos em que foi estudado o efeito do impedimento mecânico do solo, avaliado com penetrômetros, mostrou-se que o desenvolvimento máximo do sistema radicular

ocorreu quando as resistências do solo eram em torno de 0,5 a 1,0 MPa (Vepraskas, 1994; Bennie, 1996).

### 7.3.2.6 Sistema radicular da soja estratificada por camadas no solo

O comprimento do sistema radicular foi dividido em camadas e da mesma forma não apresentou diferença estatística entre os tratamentos nas diferentes camadas (Figura 25).



**Figura 25** – Comprimento total das raízes da soja, no pleno florescimento, em diferentes camadas do solo após aplicação dos tratamentos. Céu Azul- PR.

Na camada mais superficial o tratamento que apresentou maior comprimento foi o TM, seguido pelo TT e ST. Fato este explicado pela ausência da compactação do solo nesta camada. Já na camada entre 0,10 - 0,20 m ocorreu uma inversão nos tratamentos, aonde o ST foi o que produziu maior comprimento entre os tratamentos envolvidos neste estudo. No total o comprimento do sistema radicular se concentrou na camada até 0,20 m sendo 71, 90 e 86 % das raízes foi encontrada nesta camada nos tratamentos ST, TT e TM respectivamente. Corroborando com Coale & Grove (1986) e Torres et al. (1993) que determinaram, que apesar de atingir camadas mais profundas, 80-90% das raízes se concentram nos primeiros 0,20 m de solo.

### 7.3.3 Produtividade da cultura da soja

A produtividade da cultura da soja, não apresentou diferença estatística entre os tratamentos investigados, sendo a média do experimento  $4.024 \text{ kg ha}^{-1}$ . O tratamento ST com produção de  $4.225 \text{ kg ha}^{-1}$ , produzindo 26,1 % a mais que a média da produtividade da soja no estado do Paraná, no ano de 2012/2013 que foi de  $3.3448 \text{ kg ha}^{-1}$  (Embrapa, 2014), o tratamento com menor produtividade foi o TM com produção média de  $3.896 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 26).

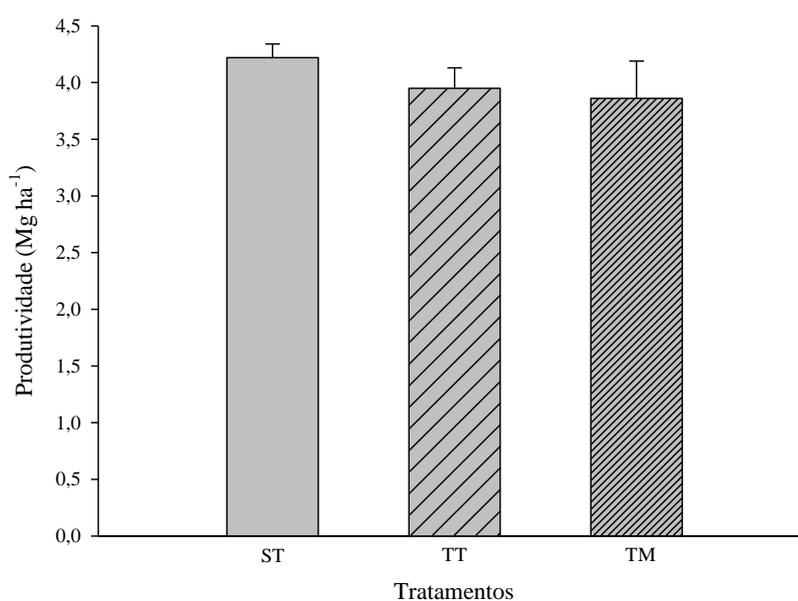


Figura 26 – Produtividade média da cultura da soja, onde: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% prob. ( $p < 0.05$ ), Céu Azul - PR.

Mesmo não apresentando diferença estatística entre os tratamentos com maior e menor produtividade a diferença foi de  $356 \text{ kg ha}^{-1}$ . Este resultado está coerente com a condição estrutural do solo não apresentar restrições ao desenvolvimento do sistema radicular (Figuras 33 e 34). Bem como as condições físicas do solo não apresentam limitações para as culturas, segundo os valores proposto por Tormena et al. (1998), mesmo após uma grande quantidade de tráfego do pulverizador especialmente, não observou-se diferença entre os tratamentos (Quadro 8 e 9). O CV foi de 19,3 %, considerado como médio pela classificação proposta por Pimental-Gomes (1985), o que pode ter contribuído para a ausência de diferença entre os tratamentos.

Outro fator que deve ser considerado diz respeito às modificações realizadas na semeadora para a execução deste projeto, pois as linhas de semeadura não sofrem pressão dos pneus, uma vez que devido às adaptações na semeadora, foi possível evitar que o rodado do trator, trafegue em cima da linha. Sendo um diferencial importante para a manutenção da qualidade estrutural do solo na linha de semeadura.

Recentemente Cardoso et al. (2006), em um trabalho realizado sob Latossolo concluíram que solos compactados em um grau moderado pelo tráfego de máquinas, associado a boa disponibilidade hídrica não reduziram a produtividade da cultura da soja. As condições climáticas foram consideradas excelentes pelo produtor. A precipitação durante o ciclo da cultura foi de 640 mm, sendo bem distribuída durante o período, em nem um momento do desenvolvimento da cultura as precipitações foram abaixo do esperado na região.

## 7.4 Conclusões

- O sistema de tráfego controlado foi instalado de maneira parcial, uma vez que na cultura de inverno, as linhas de semeadoras foram realizadas de maneira independentes das linhas de semeadura da cultura de verão.
- As condições iniciais no momento da instalação do experimento eram de não compactação do solo.
- O tráfego das máquinas não apresentou diferença estatística nos parâmetros físicos avaliados.
- A caracterização do aumento da RP através de uma intensa amostragem horizontal e vertical possibilitou caracterizar a distribuição espacial do efeito do trânsito de máquinas agrícola com concentração em profundidade.
- A produtividade da soja, não foi alterada pelo sistema de tráfego utilizado na área em uma safra com elevada precipitação.



## 7.5 Referencias Bibliográficas

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMERD, C. & SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160, 2003.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., ed. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141.
- BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: *Plant Roots: the hidden half*. WAISEL, Y., ESHEL, A., KAFKAFI, U. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 1996, 1.002 p.
- BOCHTIS, D.D.; SØRENSEN, C.G.; GREEN, O.; MOSHOU, D. & OLESEN, J. Effect of controlled traffic in field efficiency. *Biosystems Eng.*, 106:14-25. 2010.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:493-501, 2006.
- CHAMEN, W.C.T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F. & WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil Till. Res.*, 73:161-174, 2003.
- CORRÊA, I.M.; MILAN, M.; RIPOLLI, T.C.; MAZIERO, J.V.G.; YANAI, K. & MENEZES, J.F. Pneu radial e diagonal: desempenho de tração em um trator com tração dianteira auxiliar. *Eng. Agrí.*, 15:45-49, 1995.
- COALE, F.J. & GROVE, J.H. Alteration in soybean root development due to cultural practices: a review. *Soil Sci. Plan.*, 17:799-818, 1986.
- DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. *Agro. J.*, 88:141-148, 1996.

DUNN, P.K.; POWIERSKI, A.P., & HILL, R. Statistical evaluation of data from tractor guidance systems. *Precision Agri.*, 7:179-192, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

\_\_\_\_\_. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979.

HAN, S.; ZHANG, Q.; NI, B. & REID, J.F. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems. *Comput. Electro.Agric.*, 43:179–195, 2004.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C. & BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja R. *Bras. Ci. Solo*, 32:1723-1734, 2008.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. São Paulo: Esalq, 1985. p 467.

RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; CHASSE, M. & MERIENEAU, F. Development of compaction patterns due to machinery operation in orchard soil. *Can. J. Plant Sci.*, 56:505-509, 1976.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S. & HORN, R. Mecânica do Solo. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29-102.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & SILVA, V.R. Compactação do solo em sistema de plantio direto: Limites críticos e mitigação. In: COUTO, E.G. & BUENO, J.F., ed. Os (des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira. Cuiabá, UFMT, SBCS, 2004. p.167-198.

SILVA, F.A.S. & AZEVEDO, C.A.V. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:191-199, 2000.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil Till. Res.*, 1:373-400, 1981.
- SOEHNE, W. Fundamentals of preassure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agr. Eng.*, 276-290, 1958.
- TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GALERANI, P.R. Manejo do solo para a cultura da soja. Londrina: Embrapa Soja, 1993. 71p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 12).
- VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.E., ed. *Plant-environment interactions*. New York: M. Dekker, 1994. p.263-287.
- WULFSOHN, D.; UPADHYAIA, S.K. & CHANCELLOR, W.J. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tyres in a Califórnia soil. *J. Terramechanics*, 25:111-34, 1988.
- SOJA EM NÚMEROS. Disponível em < <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php>>. Acesso em 14 fev.2014.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com a evolução da agricultura e dos sistemas agrícolas não existe uma maneira prática e eficiente para evitar o tráfego de máquinas dentro de áreas comerciais de grãos, podendo o solo estar sujeito a compactação causada pelo trânsito das máquinas dentro da lavoura. Evitar este tipo de compactação por completo no campo não é uma opção prática, mas controlando o tráfego para o mínimo possível de área de faixas de tráfego permanente parece ser uma abordagem sensata, uma vez que os recentes desenvolvimentos em tecnologia de orientação de tornar isso possível.

Outras medidas de mitigação da compactação do solo são utilizadas, destacando a escarificação esporádica do solo, porém é cara e rapidamente o solo volta ser compactado pelo tráfego aleatório subsequente. O uso de pneus de baixa pressão podem reduzir as consequências do tráfego (melhorando a porosidade, reduzindo RP) aumentar os rendimentos operacionais e a produtividade das culturas, mas os benefícios são limitados, devido à sua maior largura, acaba aumentando as perdas por amassamento, e os custos financeiros elevados, são os motivos da pouca utilização pelos produtores. Outro fator da pouca eficiência deste sistema é o fato de que 75% de compactação ocorrem na primeira passagem, assim reduzindo o número de passes não foi reconhecido como um benefício a longo prazo.

Em virtude deste tipo de dificuldades para resolver este problema da compactação do solo, a utilização do sistema de tráfego controlado é uma alternativa que apresenta resultados que podem atenuar este problema, sua implantação não é onerosa, sendo mais dependente do planejamento e adaptações para dos diferentes casos de uso. Um entrave atual é a qualificação da mão de obra existente no meio rural, uma vez que se necessita de um conhecimento relativamente alto sobre questões de informática, sobre sistemas computacionais. Outra exigência é o planejamento em longo prazo, que em muitos casos não é observado devido às pressões externas (preços, custos, etc) em que muitas vezes o produtor não tem controle.

Neste trabalho de pesquisa que durou quatro (4) anos, foram observados que o tráfego de máquinas possui capacidade de alterar a estrutura física do solo, modificando as principais propriedades físicas. Estas alterações modificam a dinâmica e fluxos internos do solo, através do aumento da densidade, RP, redução da infiltração de água no solo, modificando negativamente a interação com as propriedades químicas e biológicas. Todas estas alterações ocasionadas pelo tráfego acabam refletindo negativamente no desenvolvimento, reduzindo a

produtividade das culturas perenes, especialmente quando cultivadas em solos com elevados teores de argila.

No primeiro I desta tese, que tinha por objetivo investigar as alterações nas propriedades físicas do solo, ficou evidente o efeito negativo do tráfego, aumento na densidade e na RP, que foi a variável mais sensível ao tráfego. Ainda foi possível identificar a redução macroporosidade e na infiltração de água no solo, sendo que após o tráfego ocorreu 90% de redução neste parâmetro investigado. Ainda foi possível identificar que o primeiro passe foi responsável por 86% do aumento da densidade do solo na camada superficial. A relação existente entre o tráfego de máquinas e o aumento da RP foi alta atingindo valores maiores que 60%.

No capítulo II, foi estudado as alterações que ocorreram nas plantas cultivadas no experimento. Seus resultados estão completamente ligados ao capítulo I, uma vez que as alterações que ocorreram no solo acabaram refletindo no desenvolvimento das culturas. O milho que foi cultivado no primeiro ano apresentou poucas alterações, provavelmente o pouco tráfego de máquinas, não foi suficiente para causar grandes alterações no seu desenvolvimento da cultura, alterando a produtividade final. Já a cultura da soja, foi mais sensível as alterações impostas no solo. Observou-se reduções no sistema radicular, produção de massa seca da parte aérea e na produtividade final da cultura.

No capítulo III, aonde foi discutido um estudo de caso no estado de Paraná, em que o produtor rural, planejou o sistema de tráfego controlado em um talhão da sua propriedade. Através de adaptações como aumento do espaçamento entre as linhas da cultura da soja, modificações mecânicas na semeadora e o uso eficiente do sistema auxiliar de direção foi possível fazer a implementação do sistema em um talhão comercial. Diferentemente dos resultados obtidos nos capítulos anteriores, neste estudo de caso, não foi observado diferença entre os locais com tráfego e sem tráfego de máquinas. A qualidade do manejo realizada em longo prazo nesta área, com a adoção do SPD em longo prazo, constante aporte de MOS, rotação de culturas e clima do local, atuaram de forma a minimizar os efeitos de tráfego das máquinas sobre o solo, e conseqüentemente sobre o desenvolvimento da cultura da soja.

Embora possam parecer conflitante os resultados obtidos nos dois experimentos, é possível identificar de maneira clara, que a adoção do sistema de tráfego controlado, em alguns casos, o tráfego disciplinado das máquinas dentro das áreas agrícolas, quando associado com a qualidade do manejo, podem ser altamente eficientes, reduzindo as alterações nas propriedades físicas do solo, que acabam refletindo na produtividade das culturas.

O sistema de tráfego controlado ainda é bastante incipiente no Brasil, acreditamos que este sistema possui elevado potencial de ser aplicado nas diversas regiões produtoras de grãos no país. Um grau de dificuldade um pouco maior na região sul pode ser encontrado, uma vez que a topográfica, o tamanho e o formato das áreas dificultam o planejamento das linhas de semeadura. Na região do central do país aonde, normalmente se encontram áreas maiores e com formatos mais definidos, este planejamento é facilitado.

A implementação plena do sistema em um primeiro momento pode parecer difícil, poucos estudos foram realizados sobre as consequências da semeadura ser realizadas safras após safras no mesmo local, certamente alterações químicas e biológicas serão alteradas, bem como a questão de doenças no sistema radicular, acabam refletindo no desenvolvimento das plantas. Com isso a implementação parcial do tráfego controlado, é uma alternativa viável em um primeiro momento, disciplinando os locais e a quantidade de passes, especialmente do pulverizador, são fundamentais para que se obtenha um sistema de tráfego mais eficiente.



## **9 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

A interação entre máquina-solo-planta, é complexa e dinâmica, devendo ser considerado um grande número de fatores para um entendimento sobre as mudanças que ocorrem neste ambiente. Como sugestões para estudo futuros são:

- Investigar o consumo de combustível, consumo energético e a exigência de potência das máquinas nos diferentes sistemas de tráfego.
- Pesquisar a eficiência dos equipamentos de localização geográfica utilizadas no sistema de tráfego controlado, através da sobreposição de passadas, precisão na orientação das operações.
- Definir o melhor direcionamento de tráfego das máquinas, investigando a eficiência nas operações, tempo de operações, tempo para a realização de manobras, descarregamentos.
- Formular planilhas de custo financeiro, que possam ajudar aos técnicos e produtores encontrar quais os principais custos, tempo de retorno do investimento inicial, aumento da lucratividade.