

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA POR DOIS  
SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA EM  
FLORESTAS DE *Eucalyptus grandis*  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARLA KRULIKOWSKI RODRIGUES**

**IRATI-PR**

**2013**

**CARLA KRULIKOWSKI RODRIGUES**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA POR DOIS SISTEMAS DE  
COLHEITA DE MADEIRA EM FLORESTAS DE *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo sustentável dos recursos florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller - UNICENTRO

Coorientador

Prof(a). Dr(a). Aline Marques Genú - UNICENTRO

Coorientadora

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes - UNICENTRO

Orientador

IRATI-PR

2013

Catálogo na Fonte  
Biblioteca da UNICENTRO

RODRIGUES, Carla Krulikowski.

R696c Compactação do solo causada por dois sistemas de colheita de madeira em Florestas de *Eucalyptus grandis* / Carla Krulikowski Rodrigues. Irati, PR : UNICENTRO, 2013.

83f.

ISBN

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro - Oeste, PR.  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller

Coorientadora: Profa. Dra. Aline Marques Genú

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Eucalipto. 3. Solos florestais.  
4. Captação. 5. Madeira – sistema de colheita. I. Lopes, Eduardo da Silva.  
II. Müller, Marcelo Marques Lopes. III. Genú, Aline Marques. IV. Título.

CDD 20<sup>a</sup> ed. 583.42

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

### PARECER

Defesa Nº 52

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Carla Krulikowski Rodrigues** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado “COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA POR DOIS SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA EM FLORESTAS DE *Eucalyptus grandis*”, é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 12 de julho de 2013.



*Dr. Reginaldo Sérgio Pereira*  
Universidade de Brasília  
Primeiro Examinador



*Dr.ª Karina Maria Vieira Cavaliere*  
Universidade Federal do Paraná  
Segunda Examinadora



*Dr. Eduardo da Silva Lopes*  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

À Deus  
*AGRADEÇO.*

Aos meus pais, Luiz Rodrigues e Lúcia  
K. Rodrigues, e a minha irmã, Cricilaine  
K. Rodrigues.

*DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Centro-Oeste, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de cursar o mestrado e executar o presente projeto.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

Ao professor Eduardo da Silva Lopes, pelo apoio e orientação;

Ao professor Marcelo Marques Lopes Müller, pelo aceite em coorientar o projeto;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais: Luciano Farinha Watzlawick, Julio Eduardo Arce e Afonso Figueiredo Filho, pelos ensinamentos durante o curso;

À professora Aline Marques Genú, pelas sugestões ao projeto;

À Klabin S.A. e Ibaiti Soluções Florestais Ltda. pelo grande apoio, interesse e concessão de suas áreas, permitindo que este trabalho pudesse ser realizado, e aos seus funcionários pela ajuda prestada durante as atividades de campo;

Aos amigos e companheiros que auxiliaram nas coletas de campo e laboratório, em especial à técnica Odíméia Teixeira pelo apoio e colaboração na realização das análises laboratoriais.

À minha família, em especial aos meus pais, Luiz Rodrigues e Lúcia Krulikowski Rodrigues, que nunca mediram esforços para a minha formação pessoal e profissional;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
3.1. Importância do setor florestal .....	4
3.2. Colheita florestal.....	5
3.2.1. Conceito .....	5
3.2.2. Sistemas de colheita de madeira .....	5
3.2.3. Máquinas e equipamentos .....	7
3.3. Compactação do Solo.....	8
3.3.1. Conceito .....	8
3.3.2. Efeitos negativos da compactação sobre o solo e as plantas .....	8
3.3.3. Fatores que influenciam a compactação .....	10
3.4. Atributos físicos do solo.....	15
3.4.1. Densidade do solo .....	15
3.4.2. Porosidade do solo .....	16
3.4.3. Resistência do solo à penetração .....	17
3.5. Geoestatística em estudos de compactação do solo .....	19
3.6. Planejamento da colheita e interação com a silvicultura .....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1. Área de estudo .....	22
4.2. Sistemas de colheita de madeira estudados.....	23
4.3. Procedimento amostral.....	25
4.4. Parâmetros físicos do solo estudados.....	28
4.4.1. Densidade do solo .....	28
4.4.2. Porosidade Total .....	29
4.4.3. Resistência do Solo à Penetração .....	30
4.5. Análise estatística .....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1. Sistema de Toras Curtas.....	33
5.1.1. Caracterização do solo da área estudada.....	33
5.1.2. Parâmetros físicos do solo .....	33
5.1.2.1. Densidade do solo.....	33
5.1.2.2. Porosidade total.....	39
5.1.2.3. Resistência do solo à penetração.....	43
5.2. Sistema de Árvores Inteiras.....	53
5.2.2. Caracterização do solo da área estudada.....	53
5.2.2. Parâmetros físicos do solo .....	53
5.2.2.1. Densidade do solo.....	53
5.2.2.2. Porosidade total.....	58
5.2.2.3. Resistência do solo à penetração.....	62
6. CONCLUSÕES.....	73
7. RECOMENDAÇÕES.....	74
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Telêmaco Borba, PR. ....	22
Figura 2. Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo na área experimental, nas diferentes distâncias e profundidades do solo no sistema de toras curtas.....	26
Figura 3. Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo na área experimental, nas diferentes distâncias e profundidades do solo no sistema de árvores inteiras. ....	27
Figura 4. Abertura das covas com uma cavadeira (a) e coleta das amostras com amostrador volumétrico de amostras indeformadas (TAI) em campo (b). ....	28
Figura 5. Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo nas diferentes profundidades. ....	29
Figura 6. Esquema das medições de resistência à penetração em relação à trilha de tráfego das máquinas de colheita de madeira. ....	30
Figura 7. Croqui da alocação das malhas ao longo da trilha de extração de madeira. ...	31
Figura 8. Mapas da distribuição espacial da densidade do solo $D_s$ ( $Mg\ m^{-3}$ ) nas diferentes profundidades, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do <i>Harvester</i> (HV) e após tráfego do <i>Forwarder</i> (HV + FW). ....	38
Figura 9. Mapas da distribuição espacial da porosidade total do solo $P_t$ ( $m^3\ m^{-3}$ ) nas diferentes profundidades, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do <i>Harvester</i> (HV) e após tráfego do <i>Forwarder</i> (FW). ....	42
Figura 10. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes condições de tráfego no sistema de toras curtas. ....	43
Figura 11. Valores médios de resistência à penetração (MPa) para as posições e classes de distâncias, após a atividade de extração de madeira, no sistema de toras curtas. ....	47
Figura 12. Efeitos das classes de distâncias no perfil transversal da resistência do solo à penetração (MPa), no sistema de toras curtas ....	49
Figura 13. Mapas da distribuição espacial da Resistência do solo à penetração (MPa) em área operacional da colheita de madeira pelo sistema de toras curtas nas distâncias 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 150 a 200 m, e nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm. ....	51
Figura 14. Mapas da distribuição espacial da Densidade do solo $D_s$ ( $Mg\ m^{-3}$ ) nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do <i>Feller-buncher</i> (FB), após tráfego do <i>Skidder</i> (FB + SK), no sistema de árvores inteiras. ....	57
Figura 15. Mapas da distribuição espacial da Porosidade total do solo $P_t$ ( $m^3\ m^{-3}$ ) nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40; 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do <i>Feller-buncher</i> (FB), após tráfego do <i>Skidder</i> (FB + SK), no sistema de árvores inteiras. ....	61
Figura 16. Valores médios de RP nas diferentes condições de tráfego no sistema de árvores inteiras. ....	63
Figura 17. Valores médios de resistência à penetração para as posições e classes de distâncias, após a atividade de extração de madeira, no sistema de árvores inteiras. ....	66
Figura 18. Efeito dos tratamentos ao longo do perfil em isolinhas de resistência do solo à penetração (MPa) no sistema de árvores inteiras. ....	69
Figura 19. Mapas da distribuição espacial da Resistência do solo à penetração (MPa) em área operacional da colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras nas distâncias 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m, e nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40; 40 a 60 cm. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do povoamento florestal das áreas de estudo.....	23
Tabela 2. Sistemas de colheita de madeira avaliados no estudo. ....	25
Tabela 3. Granulometria média, carbono orgânico do solo e umidade gravimétrica nas profundidades avaliadas. ....	33
Tabela 4. Valores médios de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Harvester</i> (HV) e após as passadas do <i>Forwarder</i> (HV + FW) nas diferentes profundidades avaliadas. ....	34
Tabela 5. Valores médios de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas. ....	36
Tabela 6. Valores médios de porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Harvester</i> (HV) e após as passadas do <i>Forwarder</i> (HV + FW) e nas diferentes profundidades avaliadas. ....	40
Tabela 7. Valores médios de porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas. ....	41
Tabela 8. Valores médios de resistência do solo à penetração RP (MPa) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Harvester</i> (HV) e após as passadas do <i>Forwarder</i> (FW) e nas diferentes profundidades avaliadas. ....	45
Tabela 9. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão, nas diferentes profundidades e posições avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas.....	48
Tabela 10. Percentil da área estudada dentro de cada classe de resistência do solo à penetração (Mpa), nas distâncias da trilha de tráfego da área colhida pelo sistema de toras curtas, de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150, 151 a 200 m, e nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm. ....	52
Tabela 11. Granulometria média, carbono orgânico do solo e umidade gravimétrica nas profundidades avaliadas. ....	53
Tabela 12. Valores médios de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Feller buncher</i> (FB), após as passadas do <i>Skidder</i> (FB + SK), e após a passada do Processador (FB + SK + P) nas diferentes profundidades avaliadas. ....	54
Tabela 13. Valores médios de densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras. ....	55
Tabela 14. Valores médios de porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Feller buncher</i> (FB), após as passadas do <i>Skidder</i> (FB + SK) e após a passada do Processador (FB + SK + P) nas diferentes profundidades avaliadas. ....	59
Tabela 15. Valores médios de porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras. ....	60
Tabela 17. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) antes do tráfego (AT), após passada do <i>Feller buncher</i> (FB), após as passadas do <i>Skidder</i> (SK) e após a passada do Processador (P), nas diferentes profundidades avaliadas. ....	64
Tabela 18. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão, nas diferentes profundidades e posições avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras. ....	68
Tabela 19. Percentil da área estudada dentro de cada classe de resistência do solo à penetração (MPa), nas distâncias da trilha de tráfego da área colhida pelo sistema	

deárvores inteiras, de 0 a 50, 50 a 100, 100 a 150, 150 a 200 m, e nas profundidades de  
0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm. .... 72

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>CV</i>	Coefficiente de variação
<i>Ds</i>	Densidade do solo
<i>ER</i>	Entre rodados
<i>FB</i>	<i>Feller buncher</i>
<i>FR</i>	Fora dos rodados
<i>FW</i>	<i>Forwarder</i>
<i>HV</i>	<i>Harvester</i>
<i>CO</i>	Carbono Orgânico
<i>Mss</i>	Massa de solo seca
<i>Msu</i>	Massa de solo úmida
<i>P</i>	Processador
<i>Pt</i>	Porosidade total
<i>RD</i>	Rodados
<i>RP</i>	Resistência do solo à penetração
<i>SK</i>	<i>Skidder</i>
<i>Uv</i>	Umidade volumétrica
<i>Vs</i>	Volume do anel volumétrico

## RESUMO

Carla Krulikowski Rodrigues. **Compactação do solo causada por dois sistemas de colheita de madeira em florestas *Eucalyptus grandis*.**

Este trabalho teve por objetivo principal avaliar a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas de colheita de madeira em dois sistemas em florestas de *Eucalyptus grandis*. O estudo foi realizado em uma empresa florestal, localizada no município de Telêmaco Borba, PR, sendo avaliados os sistemas de colheita de madeira de toras curtas e árvores inteiras, em solo classificado como Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa. Foram avaliados os parâmetros físicos do solo: densidade, porosidade total e resistência à penetração. A amostragem foi feita de forma sistemática abrangendo uma área para cada sistema de colheita, sendo coletadas amostras indeformadas de solo ao longo das trilhas de extração, nas classes de distâncias de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m e nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, e 40 a 60 cm de profundidade. Com os valores, realizou-se teste de normalidade e para efeito de comparação foi utilizado o teste DMS de Fisher, ao nível de 95 % de probabilidade. Realizou-se também o mapeamento em isolinhas por método da krigagem. No sistema de toras curtas, o tráfego das máquinas acarretou alterações nas significativas nas propriedades físicas em relação à condição antes do tráfego das máquinas. Ao avaliar a compactação ao longo da trilha de extração depois de realizadas as operações de colheita de madeira, notou-se que os efeitos ao solo se comportaram de forma semelhante ao longo do talhão nas duas primeiras camadas do solo, sendo crescente em profundidade nas distâncias de 0 a 50 e 51 a 100 m, onde houve maior intensidade de tráfego. Esta variabilidade espacial da compactação ficou visível nos mapas temáticos construídos por meio das técnicas de geoestatística em todos os parâmetros avaliados. No sistema de árvores inteiras, as alterações ocorridas no solo após o tráfego das máquinas também ficaram evidentes. Na região próxima à margem do talhão, onde ocorreram às manobras do *Skidder* e tráfego do Processador, a condição física do solo foi mais afetada, onde todos os parâmetros físicos avaliados apresentaram valores críticos de resistência do solo à penetração até a profundidade de 60 cm. A variabilidade da compactação ao longo da trilha de extração, de uma maneira geral, diferiu nas classes de distância de 0 a 50 e 51 a 100 m, onde houve maior intensidade de tráfego, se comparado ao centro da área. Com os mapas temáticos produzidos foi possível visualizar que a região próxima à margem do talhão foi a mais compactada após as operações de colheita de madeira, devido a maior intensidade de tráfego neste local. Desta forma, verificou-se uma variabilidade espacial da compactação do solo produzida pela atividade de colheita de madeira nos dois sistemas, sendo mais intensa na região próxima a margem do talhão. Estas informações podem servir para subsidiar o planejamento do preparo do solo da empresa de acordo com a intensidade necessária, de forma a reduzir os custos de produção.

**Palavras-Chave:** Compactação; sistemas de colheita de madeira; solos florestais.

## ABSTRACT

Carla Krulikowski Rodrigues. **Soil compaction caused by two systems of timber harvesting in forests *Eucalyptus grandis*.**

This study aimed an assessment of soil compaction caused by machinery timber harvest under two systems of harvesting forest *Eucalyptus grandis*. The study was conducted in a forest company, located in the municipality of Telemachus Borba, PR, with the following harvest systems of short logs and whole trees in soil classified as Ferralsol or Oxisol with sandy clay loam texture. We evaluated the physical parameters of the soil density, total porosity and penetration resistance. Sampling was done systematically covering an area for each harvest system and undisturbed soil samples collected along the tracks extraction, classes of distances 0-50, 51-100, 101-150 and 151-200 m the layers of 0 to 10, 10 to 20, 20 to 40 and 40 to 60 cm. With the values held normality test and for comparison test was used DMS Fisher, at 95% probability. We also conducted the mapping isolines by kriging method. In short log system, traffic machine caused significant changes in physical properties compared to the condition before traffic machines. When evaluating the compression along the track extraction operations conducted after harvest timber, it was noted that the effects of soil behaved similarly over the first two field soil layers with increasing depth in the distances 0-50 and 51-100 m, where there was more traffic. This spatial variability of soil compaction was visible in thematic maps constructed by means of geostatistical techniques in all parameters evaluated. In the system of whole trees, changes in soil after traffic machinery were also evident. In the region near the field boundary, in which there were maneuvers and Skidder traffic processor, the physical condition of the soil was deteriorated because all physical parameters evaluated showed critical values of soil resistance to penetration to a depth of 60 cm. The variability of the compression along the path of extraction, in general, the classes differ away from 0 to 50 and 51 to 100 m, which was higher traffic intensity as compared to the center of the area. With the thematic maps produced was possible to see that the region near the edge of the field was the most compacted after timber harvesting operations due to more traffic on this site. Thus, there was a spatial variability of soil compaction produced by timber harvest activity in both harvest systems, being more intense in the region near the edge of the field. This information can be used to support the planning of soil preparation company in according to compaction intensity aiming to reduce production costs.

**Keywords:** Compaction, wood harvesting systems; forest soils.

## 1. INTRODUÇÃO

Existem de forma evidente algumas tendências para o setor florestal brasileiro nos próximos anos, podendo destacar o aumento significativo das áreas com plantios florestais e o desenvolvimento de novos mercados e produtos (ABRAF, 2013). Com o aumento real da renda da população, a maior oferta de crédito, o incremento das políticas públicas para o setor habitacional e o aumento da demanda por móveis poderão influenciar muitas empresas florestais na redefinição do regime de manejo e do sistema de colheita de madeira. Assim, pode ser mais viável, do ponto de vista econômico e ambiental, a colheita em florestas de baixo volume individual em relação às florestas de grande porte e de longa rotação.

O processo de mecanização das operações de colheita de madeira possibilitou uma evolução significativa na sua produtividade, na redução dos custos de produção, na melhoria da qualidade do produto e serviço, na maior segurança e ergonomia aos operadores florestais (FERNANDES; SOUZA, 2003). Entretanto, este avanço da mecanização, aliado ao aumento do tráfego de máquinas de grande porte, tem sido uma grande preocupação por parte dos gestores florestais, principalmente em termos de compactação do solo. Pois, a alteração na estrutura física do solo poderá causar um processo acelerado de degradação, podendo ainda afetar o potencial produtivo de muitos povoamentos florestais, com conseqüente prejuízo econômico às empresas (DIAS JÚNIOR, 1999).

Atualmente, no Brasil, predominam-se dois sistemas de colheita de madeira: sistema de toras curtas (*Cut-to-length*) e sistema de árvores inteiras (*Full-tree*). No método mecanizado, o primeiro sistema é caracterizado mais comumente pelo uso do *Harvester* e *Forwarder*, onde todas as fases do corte são realizadas no interior do talhão (MACHADO, 2008). De acordo com Malinowski e Malinowski (1998), esse sistema acarreta menor impacto ambiental, devido à baixa exportação de nutrientes do solo e menor compactação, porém limita o aproveitamento da biomassa residual da colheita e acarreta em maiores custos operacionais. O segundo é caracterizado na maioria das vezes pelo uso do *Feller-buncher*, *Skidder* e Processador, onde as árvores são derrubadas no interior do talhão e, em seguida, arrastadas até a margem do talhão ou pátio intermediário, onde é realizado o processamento final. É indicado, principalmente quando se pretende produzir toras em diferentes sortimentos e aproveitar a biomassa residual para produção de energia, contribuindo ainda para manter a área limpa,

favorecendo o preparo do solo e acarretando em menores custos de produção. Porém, possibilita a ocorrência de maiores danos ambientais em termos de exportação de nutrientes, compactação e empobrecimento do solo (FREITAS, 2004).

Outro aspecto importante a ser considerado na seleção do sistema de colheita de madeira é o conhecimento da compactação do solo causada pelas máquinas ao longo das áreas operacionais, pois a compactação poderá abranger toda a área ou pode ser sistemática, dependendo do sistema de colheita a ser utilizado. Dias Junior et al., (2003), ao compararem dois sistemas de colheita em um Latossolo Vermelho-Amarelo, verificaram que, de modo geral, as operações realizadas pelo *Feller-büncher* e *Skidder* causaram uma menor compactação do solo se comparadas ao sistema com *Harvester* e *Forwarder*, cujos impactos foram sistemáticos e com localizações definidas, abrangendo menor área do talhão.

Além disso, deve-se atentar que a compactação é mais intensa nas áreas próximas aos estaleiros em relação ao interior do talhão, devido ao maior tráfego das máquinas nestes locais (SILVA et al., 2004). Tal situação deve-se ao fato da atividade de colheita de madeira possuir esta característica em quase todos os métodos existentes de extração, exceto quando realizada pelos métodos aéreos, como por exemplo, cabos aéreos, que ainda é pouco utilizado no Brasil.

Portanto, o estudo da compactação do solo é muito importante para subsidiar o planejamento do preparo de solo, sendo esta a atividade responsável para resolver os problemas relacionados à compactação do solo. Ao conhecer as condições físicas do solo e a sua variabilidade ao longo do talhão é possível realizar o manejo e o preparo de solo de acordo com a intensidade necessária.

E uma alternativa para estudar esta variabilidade espacial seria por meio de técnicas geoestatísticas, sendo possível realizar o seu mapeamento. Esta é uma ferramenta que vem sendo muito utilizada em estudos dos atributos físicos do solo, para facilitar o seu manejo, realizando com uma maior precisão em seu preparo.

Portanto, o presente estudo contribui para o melhor entendimento da compactação do solo após as operações de colheita de madeira, auxiliando o planejamento das operações e, no preparo de solo mais apropriado para cada local do talhão, gerando um aumento de eficiência das operações, redução de custos de produção e sustentabilidade florestal.

## 2. OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por objetivo geral realizar uma avaliação da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas em dois sistemas de colheita de madeira, em florestas de *Eucalyptus grandis*, gerando informações para o planejamento das operações de preparo de solo e, a sustentabilidade da produção de implantação florestal.

Especificamente, objetivou-se:

- a) Avaliar os níveis de compactação do solo causado pelo tráfego das máquinas de colheita de madeira antes e após a realização das operações;
- b) Avaliar a compactação do solo causada ao longo da trilha de extração e em diferentes profundidades do solo; e
- c) Identificar os pontos de maior incremento de compactação por meio de mapas temáticos com uso de técnicas de geoestatística, de modo a subsidiar o planejamento das operações de preparo de solo.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Importância do setor florestal

O setor de florestas plantadas se destaca como importante e relevante para a economia e a sociedade brasileira, contribuindo para a geração de produtos, tributos, divisas, empregos e renda, sendo um setor estratégico no fornecimento de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria nacional de base florestal, além de contribuir com a preservação ambiental (ABRAF, 2012).

O potencial florestal brasileiro é enorme, possuindo quase um terço das florestas tropicais úmidas e ocupando o sétimo lugar entre os países com os maiores plantios florestais. Segundo ABRAF (2013), a área ocupada pelos plantios florestais dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou, em 2012, em torno de 6,66 milhões hectares, sendo 76,6 % correspondente à área com plantios de *Eucalyptus* e 23,4 % com plantios de *Pinus*, com uma taxa média de crescimento de 2,2 % em relação a 2011. Além disso, foi responsável por um valor bruto de produção da ordem de R\$ 56,3 bilhões e por R\$ 7,6 bilhões em arrecadação de tributos.

Do ponto de vista social, as atividades da cadeia produtiva do setor florestal promovem a geração de empregos e de renda, fixação de populações no campo e auxílio para a melhoria na qualidade de vida nas áreas rurais. Em 2012, estima-se que o setor florestal manteve 4,3 milhões de postos de empregos, incluindo 0,6 milhão de empregos diretos, 1,3 milhão de empregos indiretos e 2,4 milhões de empregos resultantes do efeito-renda (ABRAF, 2013).

É importante também destacar a importância ambiental do setor de florestas plantadas, contribuindo para a conservação da natureza e para o equilíbrio do ambiente na promoção da biodiversidade, na recuperação e proteção de áreas degradadas, na manutenção dos regimes hídricos, edáficos, da qualidade do ar e fixação de carbono (SOBRINHO, 1995).

## **3.2. Colheita florestal**

### **3.2.1. Conceito**

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações realizadas no maciço florestal, que visa preparar e transportar a madeira até o seu local de utilização, empregando-se técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final (TANAKA, 1986). A colheita envolve ainda o planejamento das operações, a medição, o recebimento no pátio da indústria e a comercialização da madeira (MACHADO, 2008).

No setor florestal, a colheita de madeira é a etapa mais importante economicamente, dada a sua elevada participação no custo final do produto e os riscos de perda envolvidos. Segundo Machado (2008) a colheita de madeira é responsável por mais de 50 % do custo final da madeira posta na indústria. Enquanto Lopes (2001) afirma que pode ser influenciada por diversos fatores técnicos, ambientais, ergonômicos e sociais que interferem na forma de execução das operações. Portanto, para que a colheita de madeira proporcione significativa redução nos custos totais, é necessário que ela esteja bem planejada e seja executada com rigorosos critérios técnicos, acarretando em um baixo impacto ambiental.

### **3.2.2. Sistemas de colheita de madeira**

Existem vários métodos e sistemas de colheita e processamento de madeira no campo, conforme a espécie florestal, a idade do povoamento, a finalidade do produto e as condições gerais das áreas de colheita (MACHADO, 2008). Para cada grupo de condições específicas, certamente existe um método e sistema de colheita mais indicado a ser selecionado para que se proceda à colheita da madeira.

Conforme a classificação da *Food and Agriculture Organization* (FAO) apud Malinovski e Malinovski (1998), os principais sistemas de colheita da madeira são classificados pela forma ou estado em que a madeira é extraída do interior do povoamento. Podem-se citar cinco sistemas: Sistema de toras curtas (*cut-to-length*), sistema de toras longas (*tree-length*), sistema de árvores inteiras (*full-tree*), sistema de árvores completas (*whole-tree*) e sistema de cavaqueamento (*chipping*).

### **3.2.2.1. Sistema de toras curtas (*Cut-to-length*)**

Este sistema de colheita de madeira se caracteriza pela realização dos processos de derrubada, desgalhamento, destopamento, medição, traçamento, descascamento (opcional) e pré-extração das toras no interior do talhão. As toras resultantes possuem comprimento de 1 a 6 metros, dependendo do grau de mecanização empregado, sendo as toras posicionadas em forma de pilhas no mesmo local (MACHADO, 2008). O sistema de toras curtas quando mecanizado é composto, basicamente, por duas máquinas: *Harvester* e *Forwarder*, onde a primeira realiza o corte e processamento das árvores, enquanto a segunda realiza a extração da madeira na forma de baldeio.

Segundo Malinovski e Malinovski (1998), o sistema de toras curtas possui a vantagem de acarretar um menor impacto ambiental, devido à baixa exportação de nutrientes e menor compactação do solo. Já Machado (1989) diz que este sistema é muito utilizado quando o volume médio das árvores é inferior a 0,5 m<sup>3</sup>, situação que facilita o manuseio das toras, além de tratar-se de um sistema eficiente em operações de desbaste. Por outro lado, as maiores limitações referem-se à dificuldade de realização das operações em terrenos de declividade mais acentuada e quando existe a necessidade de aproveitamento da biomassa residual da colheita como fontes energéticas, além de acarretarem em maiores custos operacionais.

### **3.2.2.2. Sistema de árvores inteiras (*Full-tree*)**

Neste sistema as árvores são apenas derrubadas no interior do talhão, sendo em seguida, extraídas para a margem do talhão, carreador ou pátio intermediário, onde é realizado o processamento completo da madeira (desgalhamento, destopamento, traçamento e enleiramento das toras). O sistema de colheita de árvores inteiras pode ser composto, basicamente, pelas máquinas: *Feller-buncher*, *Skidder* e Processador, onde a primeira realiza a derrubada das árvores, a segunda a extração das árvores na forma de arraste e a última o processamento da madeira na margem do talhão ou pátio intermediário.

As vantagens deste sistema, de acordo com Machado (1989) são a possibilidade de deixar a área livre de resíduos, diminuindo os riscos de incêndios; facilidade no preparo do solo e aproveitamento da biomassa residual como fonte energética. Possui ainda uma vantagem especial para árvores de grandes dimensões, devido à facilidade de

execução em condições topográficas desfavoráveis e maior produtividade. Porém Malinovski e Malinovski (1998), dizem que este sistema de colheita exige um planejamento mais eficiente das operações e pode causar maiores danos ao ambiente, principalmente em termos de compactação do solo, ocasionados pelo arraste das árvores sobre o terreno e emprego de máquinas de grande porte.

### 3.2.3. Máquinas e equipamentos

De acordo com Machado (2008), a área de colheita de madeira apresenta uma grande variedade de máquinas e equipamentos disponíveis com múltiplos propósitos nas diversas atividades que a compõem, sendo as principais:

- a) **Harvester:** Projetada para executar, simultaneamente, as operações de derrubada, desgalhamento, medição automática, traçamento, descascamento (opcional) e pré-extração da madeira no interior do talhão. É composta por uma máquina-base de pneus ou esteiras, sendo a potência do motor e o peso total dependente do porte da máquina, equipado com uma lança hidráulica e um cabeçote processador.
- b) **Feller-buncher:** Projetado para executar as operações de corte e enleiramento das árvores, sendo composto por uma máquina base com rodados de pneus ou esteira, sendo a escavadeira florestal com as mesmas características utilizadas para o *Harvester*, equipado com cabeçote de disco denteado, que é um implemento frontal que realiza a derrubada e enleiramento, formando feixes de árvores, para posterior arraste e processamento.
- c) **Forwarder:** Projetado para executar a extração da madeira da área de corte para a margem do talhão ou pátio intermediário, na forma de baldeio. A máquina pode ser de pneus ou esteiras, possui chassi articulado, tração 4x4, 6x6 ou 8x8, com potência do motor e com capacidade de carga variável (8 a 20 toneladas), de acordo com o porte da máquina, além de uma grua hidráulica usada no carregamento e descarregamento das toras, com capacidade de carga variável, sendo de acordo com o seu porte.

- d) **Skidder**: Projetado para trabalhar executando a extração de feixes de fustes ou árvores inteiras do interior até a margem do talhão ou pátio intermediário na forma de arraste. A máquina pode ser equipada com rodados de pneus, esteiras ou semi-esteiras, possui chassi articulado com uma dobradiça central dirigida pela mudança de ângulos entre as seções frontal e traseira. Os tipos podem ser com cabo (*chocker Skidder*), com garra (*grapple Skidder*), ou com pinça invertida (*clambunk Skidder*).

### **3.3. Compactação do Solo**

#### **3.3.1. Conceito**

Segundo Camargo (1983), a compactação pode ser definida como a ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo a redução de seu índice de porosidade, podendo ser definido como a relação entre o volume de espaços vazios e o volume de sólidos. Trata-se de uma tensão aplicada sobre o solo resultante de mudanças em termos de incremento da densidade, redução do espaço poroso, infiltração e movimento lento da água e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes.

Vários autores diferenciam os termos adensamento e compactação ou compressão ao definirem um estado de compactação do solo. Segundo Curi (1993), o adensamento é um fenômeno natural, relacionado ao processo onde ocorre a redução do espaço poroso e o conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química. A consolidação é o processo de redução do volume do solo causada pela aplicação de uma carga externa, devido à exclusão do ar e da água dos espaços porosos e ao arranjo das partículas do solo (ROLOFF, 1986). Porém, para Reichert et al., (2007), o termo compactação está relacionado ao resultado de ação antrópica, principalmente pelo tráfego de máquinas, onde ocorrem alterações estruturais no solo com redução na sua porosidade.

#### **3.3.2. Efeitos negativos da compactação sobre o solo e as plantas**

De acordo com Dias Júnior (2000), os efeitos da compactação podem ser observados tanto no solo quanto nas plantas. Os principais efeitos encontrados são: presença de crostas, aparecimento de trincas nos sulcos formados pelos rodados da máquina, zonas endurecidas, empoçamento de água, erosão hídrica, longa permanência

de resíduos parcialmente decompostos após sua incorporação, necessidade de maior potência das máquinas no preparo de solo, entre outros. Para as plantas, destacam-se: baixa emergência e variação no tamanho das plantas, sistema radicular raso e horizontal, raízes tortuosas ou com má formação, entre outros.

Segundo Goss et al., (1984), a compactação ao modificar a estrutura do solo diminui a taxa de infiltração tornando-o mais susceptível à erosão, devido ao aumento do escoamento superficial e da constante saturação do perfil do solo. Para Borges (1986), tais alterações acarretam sérios danos às raízes, devido às condições de anaerobiose e redução química, além de causar uma redução no transporte de nutrientes em direção às raízes.

O problema de aeração resultante da compactação devido à redução dos macroporos, causado pelo realinhamento das partículas do solo pode restringir a difusão de CO<sub>2</sub> para fora do solo e a entrada de O<sub>2</sub> (RUARK et al., 1982; STARTSEV; McNABB, 2009). Conseqüentemente, com a diminuição da quantidade de oxigênio disponível, o desempenho de processos metabólicos das plantas se torna limitado (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

Para Santos (1995), a compactação do solo pode também afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, pois os processos de fluxo de massa e de difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes são dependentes da condição física do solo, principalmente pela sua densidade. Além disso, a compactação pode afetar a quantidade de nutrientes disponíveis, à medida que altera a mineralização de compostos orgânicos, em função de afetar a aeração e a umidade do solo.

O efeito da compactação no desenvolvimento das plantas é percebido, quando a raiz encontra resistência mecânica ao seu crescimento. Este impedimento ocorre quando o diâmetro da raiz é superior ao diâmetro do poro no solo. Caso a raiz não consiga romper esse impedimento, o seu sistema radicular aumenta de diâmetro e permanece nas camadas superficiais do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Lima et al., (2006) ao estudar o desenvolvimento do *Eucalyptus grandis*, observou um aumento significativo do diâmetro médio de raiz em relação ao aumento na densidade do solo. Para Corns (1988) com um aumento de densidade do solo, houve uma redução de aproximadamente 48 % no comprimento de raízes, 15 % no crescimento em diâmetro e 17 % em altura em mudas de *Pinus sp.* Isso se deve a uma série de modificações ocorridas, tanto de ordem fisiológica quanto morfológica, tornando-se mais grossas, com parede celular mais espessa, demandando maior taxa de

respiração, o que pode causar a redução na pressão de turgescência da célula ou na maior resistência da parede celular ao alongamento (BORGES et al., 1997).

### **3.3.3. Fatores que influenciam a compactação**

Existem diversos fatores que influenciam diretamente a compactação do solo em áreas de plantios florestais, podendo destacar o teor de matéria orgânica, a fração granulométrica, a umidade do solo, a presença de resíduos sobre o solo, o tipo de máquinas e rodados, o tamanho, pressão de ar dos pneus, o número de passadas de determinada máquina, dentre outros.

#### **3.3.3.1. Matéria orgânica do solo**

O teor de matéria orgânica é caracterizado como um dos fatores responsáveis pela manutenção das condições físicas dos solos, que influencia a resposta dos solos à compactação (DIAS JÚNIOR et al., 1999). Segundo Soane (1990), existem vários mecanismos pelos quais a matéria orgânica influencia a capacidade dos solos em resistir às forças de compactação: força de união entre partículas e entre agregados, elasticidade, efeito de diluição, efeito de cargas elétricas e efeito na fricção.

A influência da matéria orgânica no solo se deve aos micro-organismos que agem na sua decomposição. Estes agentes auxiliam na formação da estrutura do solo, como cimentantes de partículas, por meio de seus micélios, no caso dos fungos e actinomicetos e por substâncias viscosas, no caso das bactérias (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Zhang et al., (1997) afirmam que a susceptibilidade do solo à compactação decresce com o incremento no teor de carbono orgânico no solo devido à redução da faixa de umidade na qual o solo exibe propriedades plásticas.

Segundo Reichert et al., (2007) os efeitos da matéria orgânica são mais pronunciados em solos arenosos, sendo estes mais susceptíveis à alteração de sua estrutura, porém, sua recuperação é mais rápida em relação aos solos argilosos. Braidá (2004) diz que isso ocorre porque matéria orgânica retém maior quantidade de água, e esta fica concentrada próximo às partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia, enquanto, no solo argiloso, as diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais da fração argila são

menores, e as suas interações são maiores, o que resulta em menor disponibilidade de matéria orgânica para interagir com a água do solo.

### **3.3.3.2. Fração granulométrica do solo**

O termo fração granulométrica do solo se refere à distribuição do tamanho das partículas minerais do solo, tomando como base seu diâmetro, menores que 2 mm referindo-se especificamente às proporções relativas dos diversos grupos de minerais. Ao conhecer suas proporções, o planejamento do uso do solo é facilitado, visto que é uma característica básica, ou seja, ela não é prontamente sujeita a mudanças. A textura é uma característica do solo tão importante, que determina inclusive seu valor econômico (REICHARDT; TIMM, 2004).

As frações areia, silte e argila influenciam em algumas propriedades e comportamentos do solo tais como a capacidade de retenção de água, aeração, taxa de drenagem, teor e decomposição de matéria orgânica, erosão eólica e hídrica, capacidade de armazenamento de nutriente, entre outros. A textura influencia também o comportamento do solo submetido a pressões externas, pois determina o atrito entre as partículas e o tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores às partículas do solo, menor a sua compressibilidade e agregação (HORN; LEBERT, 1994).

A textura do solo afeta a sua porosidade e conseqüentemente a sua densidade. Solos de textura fina possuem menor densidade em relação aos solos arenosos, pois as partículas de textura fina tendem a se organizar em grânulos porosos, principalmente na presença de adequado teor de matéria orgânica. Em solos arenosos o teor de matéria orgânica é baixo, as partículas são menos susceptíveis a formarem agregados e conseqüentemente a densidade é maior que solos de textura fina (BRADY; WEIL, 2003).

### **3.3.3.3. Umidade do solo**

A umidade é o fator que controla a deformação que poderá ocorrer no solo (FIGUEIREDO et al., 2000). A água atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas. Desta forma, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento da umidade, sendo um processo que continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo, e a partir desse momento, cada

incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade (SILVA et al., 2000). Assim, quando a umidade do solo é ótima e a pressão de contato é elevada, uma única passada de determinado veículo pode ser suficiente para compactar o solo, causando impedimento ao desenvolvimento da planta (TROUSE Jr., 1978 *apud* CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Lopes et al., (2011) ao avaliar a compactação de um Cambissolo Húmico Aluminíco típico causada pela colheita de *Pinus taeda* no sistema de árvores inteiras (*Feller-buncher* e *Skidder*) em diferentes umidades, notaram um maior incremento da densidade do solo, redução da porosidade total e aumento da resistência do solo à penetração, quando as operações foram realizadas na maior condição de umidade.

#### **3.3.3.4. Camada de resíduos da colheita de madeira**

A permanência de resíduos da colheita de madeira durante a realização das operações, principalmente ao longo das trilhas de extração pode auxiliar na atenuação da compactação do solo causado pelo tráfego das máquinas (McDONALD; SEIXAS, 1995). Isto ocorre devido ao fato das camadas de resíduos possuírem a finalidade de distribuir as pressões exercidas pelas máquinas, evitando que seja superada a capacidade de suporte de carga do solo, e assim, reduz os efeitos da compactação e formação de sulcos pelos rodados (MCMAHON, EVANSON, 1994).

Alguns estudos ao avaliar o efeito da camada de resíduos de colheita no solo confirmam esta atenuação aos níveis de compactação do solo. Seixas et al. (1995) detectaram reduções significativas em torno de 40 % do incremento na densidade de um solo quando um *Forwarder* trafegou sobre a camada de resíduos da colheita de madeira.

Seixas et al., (1998) observou uma redução no nível de compactação nos tratamentos com cobertura, com carga de área de 5 e 16 kg m<sup>-2</sup>, medido por meio da densidade aparente, que proporcionou uma redução média de 56 %. Já Wronski (1980) verificou que para cada 10 kg m<sup>-2</sup> adicionais de resíduos colocados sobre outros 10 kg m<sup>-2</sup>, houve um aumento de 25 % na capacidade de suporte do solo, tornando-o mais resistente às alterações das suas propriedades físicas, e assim, reduzindo os efeitos nocivos da compactação.

### **3.3.3.5. Carga e pressão média de contato**

Segundo Seixas (1997), o tráfego de máquinas nas atividades de colheita de madeira causa uma grande pressão sobre o solo, sendo esta atividade, fonte das principais forças causadoras da compactação em solos florestais. Entretanto, Etana et al., 1997 afirma que a compressibilidade são determinadas as propriedades físico-mecânicas do solo e segundo Faure (1981) em menor grau do nível e modo de aplicação da energia.

Conforme Camargo e Alleoni (1997), a pressão média que o pneu exerce sobre a superfície é aproximadamente igual à pressão interna dos pneus. Porém, pode-se dizer que, quando o solo se encontra bem agregado, ocorre uma deformação maior no pneu do que no solo, e quando o solo se encontra pouco agregado ambos se deformam, sendo primeiramente o solo e após o pneu.

VandenBerg e Gill (1968) verificaram que para solos arenosos e firmes houve uma pequena deformação do solo e altos valores de pressão, enquanto em solos soltos, houve maior deformação do solo, acarretando sulcos profundos e não ocorrendo altos valores de pressão. Os altos valores de pressão registrados pelas células de carga para solos soltos não representaram as pressões de enchimento dos pneus. As leituras máximas foram obtidas na frente do pneu para solo já compactado, enquanto para as laterais do pneu, a variação da tensão se deu pela flexibilidade da carcaça.

### **3.3.3.6. Tipo e tamanho de rodados**

A pressão aplicada sob a superfície do solo é igual ao peso total distribuído sobre a área de contato entre o solo e o pneu. Quando o rodado é de pneu, a área de contato vai depender da pressão de inflagem, que é um termo utilizado para denominar a pressão de ar nos pneus com a carga aplicada à roda ou lastro adicionado, de modo a estabelecer a pressão correta em que os pneus devem ser calibrados para evitar efeitos compactantes (LANÇAS, 1997).

Outra característica dos rodados que influencia nos efeitos da compactação do solo é o correto dimensionamento dos mesmos, de tal forma que o peso da máquina seja distribuído sobre uma maior área de contato. Segundo Seixas (1997) as operações de colheita de madeira em altas condições de umidade utilizando *Skidders* de pneus largos causam menor redução da infiltração e aeração do solo se comparado com o uso de

pneus mais estreitos. Taylor et al., (1989) afirmaram que a maior quantidade de pneus na máquina também reduz o risco de compactação do solo, o uso de pneus duplos se destacam por compactarem com menor intensidade, se comparado aos pneus simples.

Com relação ao uso de rodados com semiesteira ou esteiras, pode-se dizer que estes causam menores impactos ao solo comparados aos pneus. Bygdén et al. (2003), afirmam que o uso de rodados com semiesteiras ou esteiras reduzem de forma significativa a compactação e os distúrbios ao solo. Lopes et al., (2011) ao comparar *Skidders* de pneus e semiesteira afirmam que de forma geral não houve diferença significativa nas propriedades físicas do solo avaliadas, porém destaca que o maior incremento da densidade do solo ocorreu na situação de tráfego do *skidder* com rodados de pneus nas camadas superficiais.

### **3.3.3.7. Intensidade de tráfego**

O efeito da intensidade de tráfego durante a colheita de madeira é um dos condicionantes da compactação do solo. Diversos estudos afirmam que a maior parte do aumento da densidade do solo ocorre durante as primeiras passadas de uma máquina (JAKOBSEN; GREACEM, 1985; FERNANDES et al., 1997).

Seixas et al., (2003), ao avaliarem a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo causado por um *Forwarder* com 42,3 t de peso total carregado, observou um aumento dos efeitos com o maior número de passadas, atingindo após 11 passadas, 74 % da compactação final resultante de 25 passadas do trator. Sampietro (2010) ao estudar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas de colheita da madeira na compactação de diferentes solos florestais em povoamentos de *Pinus taeda L.* pelo sistema de árvores inteiras, verificou que a densidade aumentou de forma gradual com as passadas das máquinas, sendo que 67 % do incremento total da densidade ocorrido após a condição de maior intensidade de tráfego (uma passada do *Feller-buncher* e 15 passadas do *Skidder*), já ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder*.

Sendo assim, a restrição ao tráfego das máquinas na área pode ser uma medida para diminuir o impacto da compactação dos solos em um plantio florestal. Dessa forma, a concentração do tráfego em trilhas pré-determinadas não implicaria aumento significativo na compactação, pois o maior e inevitável impacto já teria ocorrido após as primeiras passadas da máquina (SEIXAS et al., 2007).

Portanto, a escolha do sistema de colheita de madeira também influencia no percentual da área que será atingida pelo deslocamento das máquinas devido ao seu número de passadas. De acordo com Fenner (2002), a utilização do sistema de árvores inteiras, composto por *Feller-buncher* e *Skidder* implica que, praticamente toda a área sofre tráfego pelo menos uma vez. Já no emprego do sistema de toras curtas, composto por *Harvester* e *Forwarder*, o tráfego fica concentrado nos ramais de extração de madeira, com a área trafegada dependendo da distância entre os ramais.

### **3.4. Atributos físicos do solo**

#### **3.4.1. Densidade do solo**

A densidade ou massa específica seca do solo é um importante indicador de sua qualidade física, pois apresenta menor ou nenhuma dependência de outros fatores como a umidade (REICHERT et al., 2007). É definida pela razão entre massa de sólidos e volume do solo (volume de sólidos mais espaços porosos), denominada como densidade de solo seco ou densidade aparente e expressa em  $\text{Mg m}^{-3}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$  ou  $\text{g cm}^{-3}$  (BLAKE; HARTGE, 1986).

A densidade do solo é um parâmetro que expressa muito bem o efeito da compactação do solo, pois representa o grau de impedimento mecânico que restringe ou inibe o crescimento das raízes (TAYLOR; GARDNER, 1963). Durante o processo de compactação as partículas e a microestrutura são alinhadas em direção perpendicular à aplicação da carga, causando uma redução no volume, formando um arranjo mais denso. Este aumento da densidade do solo é diretamente proporcional ao aumento da resistência mecânica e inversamente proporcional a porosidade total do solo e de aeração (CAMARGO, 1999; PREVEDELLO, 1996).

O valor do nível crítico da densidade do solo é variável entre os autores. Para Geist et al., (1989), incrementos acima de 15 % no valor de densidade inicial do solo, podem ser considerados como críticos ao desenvolvimento radicular de espécies florestais. Para Torres e Saraiva (1999), a densidade varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos varia de 1,0 a 1,45  $\text{Mg m}^{-3}$  para as condições de floresta nativa e muito compactados, respectivamente, e para solos arenosos apresentam densidades variáveis entre 1,25 a 1,70  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente.

Rab (1996) ao estudar o desenvolvimento de *Eucalyptus regnans*, observou que o crescimento em altura e diâmetro com um ano de idade, correlacionou-se negativamente com a densidade do solo na camada superficial entre 0 a 10 cm, apresentando reduções de até 50 % no incremento em altura e diâmetro da espécie, quando a densidade aumentou de  $0,91 \text{ Mg m}^{-3}$  para  $0,96 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo que estes incrementos cessariam em solos com densidade de  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ .

De acordo com Reinert et al., (2006), pode-se estimar a densidade crítica e restritiva do solo por meio de equações obtidas com base em dados de vários trabalhos publicados, onde apresentaram uma relação entre a densidade crítica ( $D_{sc} \text{ IHO}$ ) com o teor de argila dos solos, e outra relação entre a densidade do solo restritiva ( $D_{sc} \text{ Rest}$ ) e o teor de argila, como segue a seguir.

$$D_{sc} \text{ IHO} = - 0,00072 \cdot \text{Argila} + 1,79321 \quad (R^2 = 0,87)$$

e

$$D_{sc} \text{ Rest} = - 0,00070 \cdot \text{Argila} + 1,86045 \quad (R^2 = 0,83)$$

onde:  $D_{sc} \text{ IHO}$  = densidade do solo crítica ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $D_{sc} \text{ Rest}$  = densidade do solo restritiva ( $\text{g cm}^{-3}$ ); Argila = teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

É considerado como densidade crítica ( $D_{sc} \text{ IHO}$ ) os valores que devem ser tomadas medidas preventivas ou recuperadoras para que a densidade não aumente, tornando-se, dessa forma, restritiva ( $D_{sc} \text{ Rest}$ ) (Reichert et al., 2007).

### **3.4.2. Porosidade do solo**

A porosidade total do solo é uma importante propriedade física, sendo caracterizada pela fração volumétrica do solo responsável pelo armazenamento, disponibilidade e transporte de ar e solução do solo (HILLEL, 1970; CUNHA et al., 2010).

O que determina a quantidade e a natureza dos poros existentes no solo são os arranjos ou a geometria das partículas. A variabilidade das partículas do solo em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, diferem os poros consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura, tortuosidade e outras características. A porosidade depende, principalmente, da fração textural e da estrutura

dos solos (KIEHL, 1979). Solos de textura arenosa são constituídos de partículas maiores, conseqüentemente o espaço poroso também é constituído de poros maiores denominados de macroporos, entretanto, nesses solos o volume total de poros é pequeno. Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 0,32 a 0,47 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, enquanto os solos argilosos variam de 0,52 a 0,61 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e os solos francos um valor intermediário (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2005).

O sistema poroso do solo pode ser classificado de acordo com a sua morfologia em: macroporos, que são geralmente encontrados em unidades estruturais, permitem rápida movimentação de ar e drenagem da água, também acomodam as raízes das plantas e uma ampla gama de pequenos organismos que habitam o solo, seu diâmetro efetivo varia de 0,08 a 5,00 mm; mesoporos, que tem a função de reter a água, o movimento de água por capilaridade, serve de habitat para fungos e raízes finas, seu diâmetro varia de 0,03 a 0,08 mm; microporos, que servem para reter a água disponível às plantas e habitat para as bactérias, com diâmetro de 0,005 a 0,03 mm; ultramicroporos (0,0001 a 0,005 mm) presente em solos argilosos e os criptoporos (menores do que 0,0001 mm) que exclui todos os micro-organismos e moléculas de maior tamanho (BRADY; WEIL, 2003).

Alterações causadas na porosidade modificam suas taxas de trocas gasosas e alteram a disponibilidade de água para as plantas (FERREIRA et al., 2010). A compactação excessiva reduz a porosidade total do solo pela compressão do espaço poroso e pelo rearranjo das partículas do solo. A distribuição do tamanho do poro é tipicamente alterada pela redução do volume, abundância e direção dos poros, reduzindo a velocidade de fluxo de água saturada, redução da infiltração e a velocidade do fluxo de gases, aumentando a condutividade e a difusividade térmica, bem como a resistência à penetração de raízes (SMITH et al., 1997).

### **3.4.3. Resistência do solo à penetração**

A resistência do solo à penetração tem sido usada ao longo de muitos anos com várias aplicações em muitos campos de pesquisas, por ser de fácil uso, rápido diagnóstico do nível de compactação em várias profundidades e operacionalmente econômico (PERUMPRAL, 1987). A resistência do solo à penetração é uma propriedade dinâmica do solo identificada como a reação do solo à ação de uma força aplicada através de uma ponteira cônica (BALASTREIRE, 1987). A sua avaliação pode

ser feita por meio de penetrógrafos ou penetrômetros (REINERT et al., 2007), sendo os resultados afetados pelo diâmetro da base, ângulo e aspereza da superfície do cone (PERUMPRAL, 1987).

Considera-se a resistência como uma das propriedades físicas importantes para o manejo e estudo da qualidade física dos solos, uma vez que essa propriedade está relacionada aos diversos atributos indicadores do grau de compactação, como a densidade do solo, porosidade e conteúdo de água em solos cultivados. Portanto, conhecer estes parâmetros físicos é de fundamental importância na escolha do sistema de preparo mais adequado ao crescimento e desenvolvimento das culturas (RIBON; TAVARES FILHO, 2008).

Segundo Balastreire (1987), a resistência do solo aumenta com a compactação, sendo que o principal fator que a afeta a uma dada densidade é a umidade, pois a resistência será maior quanto menor o teor de água existente. Outro fator que influencia a relação de resistência e compactação é a distribuição e tamanhos de partículas no solo. Quanto mais argila presente no solo, menor o tamanho médio dos poros e maior a resistência à penetração em uma dada densidade. Segundo Rosolem et al., (1999), solos com conteúdo de argila acima de 40 % têm maior resistência à penetração, enquanto que em solos arenosos, o incremento da resistência é menos acentuado.

É importante ressaltar que, o crescimento radicular se relaciona de forma negativa com a resistência a penetração. Rípoli (1985) adverte que um aumento excessivo na resistência do solo pode significar enrugamentos e torções nas raízes, dificultando a absorção e translocação da solução nutritiva.

Observa-se que muitos autores citam vários valores críticos de resistência à penetração. Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas. Para Lapen et al., (2004), a resistência de 2,0 MPa é considerada de forma frequente como crítica para o crescimento das plantas, enquanto para Zou et al., (2000) o valor limite restritivo para o desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais é 3 MPa. Esta variação de valores de resistência à penetração considerados críticos e restritivos ao crescimento e produtividade de plantas entre os trabalhos pode estar associada ao tipo de solo, espécie ou variedade envolvida e umidade do solo no momento da avaliação (GREACEN; SANDS, 1980 *apud* Reichert et al., 2007).

### **3.5. Geoestatística em estudos de compactação do solo**

Muitos pesquisadores, ao estudar a variabilidade dos atributos do solo, utilizam a estatística clássica, que pressupõe que as observações de um dado atributo são independentes entre si, desconsiderando sua localização na área. Estes experimentos são conduzidos para minimizar o impacto da variabilidade espacial, e desta maneira, o fato de que as observações podem ser espacialmente dependentes são ignorados. Devido a estas limitações, torna-se necessário o uso de uma ferramenta que consiga detectar o grau de dependência entre as amostras, levando em consideração as coordenadas geográficas de cada ponto (CARVALHO et al., 2004). A partir desta necessidade, surge o conceito da geoestatística, que segundo Asce (1990) pode ser definida como um conjunto de técnicas estatísticas que visam à solução de problemas de estimativa envolvendo variáveis espaciais.

Conforme Vieira (2000) existem estudos utilizando os princípios da Geoestatística realizados por volta de 1910. Porém, Krige (1951), trabalhando com dados de mineração de ouro, concluiu que as variâncias obtidas por meio da abordagem clássica de amostragem não faziam sentido se não considerassem as distâncias entre as amostras. Foi então, que Matheron (1963), baseado nestas observações, desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, sendo definida como uma função espacial numérica, variando de um local para outro, apresentando continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma simples função matemática.

A partir da década de 80, a análise espacial de dados, como a geoestatística teve grande aplicabilidade em temas da ciência do solo, e mais especificamente, em física do solo (VIEIRA et al., 1981; LIBARDI et al., 1986; MORKOC et al., 1985; YATES et al., 1988. Uma justificativa para o fato é a facilidade computacional que viabilizou alguns cálculos relativamente trabalhosos nesta metodologia.

A geoestatística permite a interpretação dos resultados do estudo com base na estrutura da variabilidade natural, considerando a existência de dependência espacial dentro do espaço de amostragem, sendo o semivariograma o ajuste teórico dos dados a modelos matemáticos e um dos aspectos mais importantes da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas (ABREU et al., 2003). Logo, espera-se que as observações mais próximas geograficamente se comportem de forma mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias, de tal forma que a diferença entre duas

amostras deve crescer à medida que se aumenta a distância entre elas, até um valor no qual os efeitos locais não teriam mais influência (CAMARGO et al., 2004).

No aplicativo GS+, utiliza-se as cinco opções de modelos isotrópicos: esférico; exponencial; gaussiano; linear e linear com patamar (GS+, 2000). Para a seleção do melhor modelo a análise é realizada de acordo com a estrutura do semivariograma, com base no efeito pepita ( $C_0$ ), no patamar ( $C$ ) e no alcance ( $a$ ). Além disso, existem outros parâmetros que são fornecidos pelo programa, como o alcance efetivo, estrutura ou proporção espacial, soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

A confirmação do modelo que fornece o melhor ajuste é efetuada por meio da escolha do modelo que apresentar o menor erro. Ajustado o modelo se faz a interpolação de dados, técnica pelas quais são geradas as estimativas de dados em pontos não amostrados a partir de pontos amostrados, a validação dos dados, pela técnica da validação cruzada e a confecção dos mapas de isolinhas (ZIMBACK, 2001).

### **3.6. Planejamento da colheita e interação com a silvicultura**

Define-se como planejamento florestal o desenvolvimento de processos, técnicas e atitudes administrativas, que proporcionam uma situação viável de avaliar as implicações futuras de decisões presentes, em função dos objetivos da empresa, que auxiliarão na tomada de decisão de modo mais rápido, coerente, eficiente e eficaz (MALINOVSKI, 2007).

De acordo com Machado (2008), os objetivos do planejamento da colheita de madeira são abordar todos os fatores que possam interferir nas operações, buscando antecipar os problemas que normalmente as afetam. É importante identificar as variáveis envolvidas com antecedência, para que os impactos sobre a produção e os custos sejam estimados e as correções, em relação ao plano original, sejam efetuadas antes do início das operações, de modo a cumprir as metas de produção estabelecidas pela empresa.

Um destes fatores são os aspectos ambientais, o alto custo e os problemas causados pela colheita de madeira fazem com que o planejamento seja de suma importância para essa atividade, pois é necessário o estabelecimento de métodos e técnicas mais adequadas de trabalho. Para realizar a colheita de madeira eficiente e com minimização dos processos de compactação e erosão é necessário conhecer a

capacidade suporte do terreno onde serão executadas as operações de colheita, e desta forma pode-se planejar quais são as áreas críticas e definir os maquinários a serem utilizados. Outro fator ambiental são as condições climáticas, sendo a precipitação o fator mais importante, que quando em condições elevadas podem limitar as operações de colheita de madeira (MACHADO, 2008).

A colheita de madeira também influencia no planejamento do preparo de solo, que quando bem elaborado o tráfego das máquinas, os efeitos compactantes são minimizados, e conseqüentemente, o custo com preparo de solo pode ser reduzido, realizando-o de forma diferenciada ao longo do talhão.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

Esta pesquisa foi realizada nas áreas operacionais de colheita de madeira pertencentes à empresa Klabin S.A., no município de Telêmaco Borba, Paraná, localizada entre as coordenadas geográficas Latitude 24° 19' 37" Sul e Longitude 50° 36' 58" Oeste (Figura 1), com altitude média 760 metros em relação ao nível do mar. Os dados foram coletados nos blocos florestais “Agronomia” e “Faisqueira”, da Fazenda Monte Alegre.



**Figura 1.** Localização do município de Telêmaco Borba, PR. Fonte: Telêmaco Borba, 2005.

O clima predominante da região de estudo, de acordo com o sistema de classificação climática de Köppen, está situado entre a região Cfa e Cfb, com predomínio do Cfa, apresentando temperatura média no mês mais frio inferior a 18° C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente, acima de 22° C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendências de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida. A umidade relativa média anual encontra-se entre 70 a 75 %, com precipitação média anual de 1400 a 1600 mm, conforme informações do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2000).

O relevo nas áreas de estudo foi classificado como suavemente ondulado, com declividade variando de 3 a 8 %. O solo predominante da área de estudo é o Latossolo

Vermelho, de textura franco-argilo-arenosa, conforme classificação realizada pela empresa.

Entretanto, para a confirmação desta informação nas áreas operacionais de ambos os sistemas de colheita de madeira foram coletadas quatro amostras deformadas de solo nas distâncias de 25, 75, 125 e 175 metros ao longo de uma trilha de extração, localizada ao centro das três trilhas avaliadas, e em quatro camadas de profundidades (0 a 10; 10 a 20; 20 a 40 e 40 a 60 cm), de modo a permitir a determinação da granulometria do solo, enquanto o teor de matéria orgânica foi obtido a partir da obtenção de uma amostra composta para cada profundidade.

A granulometria foi realizada pelo método da pipeta, para determinação do carbono orgânico utilizou-se o método de Walkley-Black modificado e a umidade gravimétrica foi obtida pelo método proposto pela EMBRAPA (1997). Estas análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Os dados referentes às características do povoamento das áreas de estudo estão discriminados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características do povoamento florestal das áreas de estudo.

<b>Sistema de colheita</b>	<b>Toras curtas</b>	<b>Árvores inteiras</b>
Bloco da empresa	Agronomia	Faisqueira
Espécie	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
Idade de corte (anos)	7	7
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	30,2	33,4
Número de árvores por hectare	1217	1217
Espaçamento (m)	3x2	3x2
DAP médio (cm)	17,5	17,7
Altura média (m)	28,2	26,5
Volume médio por árvore (m <sup>3</sup> )	0,3043	0,3104
Volume médio c/c por hectare (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	370,0	396,0
Peso médio (t/ha)	324,5	347,3
Tamanho da área estudada (m <sup>2</sup> )	4700,0	4120,0

#### 4.2. Sistemas de colheita de madeira estudados

O estudo foi realizado contemplando dois sistemas de colheita de madeira: toras curtas (*Cut-to-length*) e árvores inteiras (*Full-tree*), ambos utilizados pela empresa.. As características dos maquinários que compõe cada sistema se encontram na Tabela 2.

#### **a) Sistema de toras curtas**

O sistema de toras curtas é caracterizado pelas operações de corte e processamento e extração da madeira na forma de baldeio. A operação de corte e processamento foi realizado pelo trator florestal *Harvester*, da marca Caterpillar e modelo 320D FM, com potência líquida no volante de 157 HP, peso de 26,4 t, com rodados de esteira e equipado com cabeçote Log Max 7000C. O equipamento era responsável pelo corte e processamento de cinco fileiras de árvores, direcionando-as de forma a distribuir a galhada no ramal e empilhamento das toras com dimensões de três metros de comprimento na quinta fileira.

A operação de extração da madeira era realizada pelo trator florestal *Forwarder*, da marca Valmet e modelo 860 8x8, com potência nominal do motor de 157 HP, com peso de 25,5 t e com rodados de pneus. A máquina era responsável pela remoção da madeira de dentro até a margem do talhão na forma de baldeio, trafegando sobre os mesmos ramais formados pelo *Harvester*, sendo registrado o número de passadas da máquina ao longo da trilha de extração.

#### **b) Sistema de árvores inteiras**

O sistema de Árvores Inteiras é caracterizado pelas operações de corte, arraste e processamento da madeira. A operação de corte, composto pela derrubada e enleiramento das árvores em feixes foi realizado pelo trator florestal *Feller-buncher*, da marca Tigercat, modelo L870C, com potência de 300 HP, peso de 31,3 t, com rodados de esteiras e equipado com cabeçote Tiger 570Z. A máquina era responsável pelo corte de sete fileiras de árvores na situação de entrada do talhão e seis fileiras de árvores na saída do talhão. A extração foi realizada em direção das entrelinhas do plantio.

Em seguida, o arraste dos feixes de árvores do interior até a margem do talhão ou estaleiro era realizado pelo trator florestas *Skidder*, marca Tigercat, modelo 635D, 6x6, com potência de 260 HP, peso de 21,4 t e com rodados de pneus.

Por fim, o processamento das árvores na margem do talhão era realizado pelo trator florestal *Harvester* (processador), da marca John Deere, modelo 903J, potência 294 HP, com peso de 28,7 t e rodados de esteira.

**Tabela 2.** Sistemas de colheita de madeira avaliados no estudo.

Sistema	Atividade	Máquina	Características
Toras Curtas	Corte e processamento		<i>Harvester Caterpillar 320D FM Cabeçote Log Max 7000C</i>
	Baldeio		<i>Forwarder 6x6 VALMET 890</i>
Árvores Inteiras	Corte		<i>Feller Buncher TIGERCAT L870 C Cabeçote TIGERCAT 570Z</i>
	Arraste		<i>Skidder 6x6 TIGERCAT 635 D</i>
	Processamento		<i>Harvester- Processador John Deere 903 J Cabeçote Waratah HTH622B</i>

### 4.3. Procedimento amostral

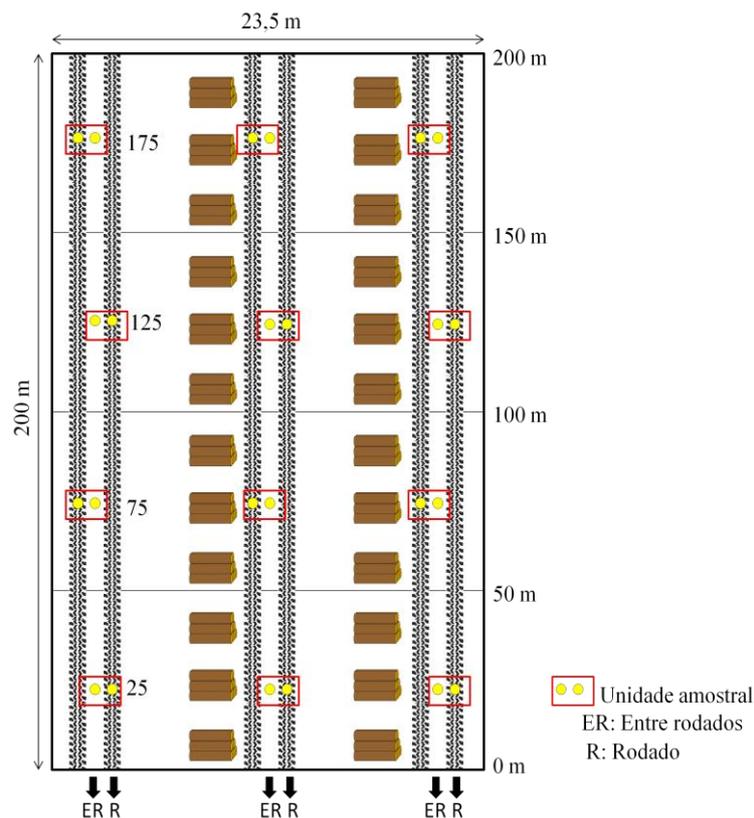
#### a) Sistema de toras curtas

No sistema de toras curtas foram coletadas amostras indeformadas de solo para a obtenção da densidade do solo e da porosidade total, em três momentos na área de estudo: antes do tráfego das máquinas (testemunha), após a passada do *Harvester* e após as passadas do *Forwarder*, sendo coletadas amostras na posição da linha dos rodados e

entre rodados para compor a unidade amostral, obtendo-se a média dos pontos amostrados.

Para a avaliação da compactação do solo causado pelo tráfego das máquinas ao longo da trilha de extração foram retiradas amostras de solo nas distâncias de 25; 75; 125 e 175 metros da margem do talhão, compreendendo as faixas de extração de 0 a 50; 51 a 100; 101 a 150 e 151 a 200 metros, onde ocorreram em média a 20, 16, 10 e seis passada do Forwarder, respectivamente, considerando as situações de viagens vazia e carregada (Figura 2). Foram ainda retiradas amostras nos intervalos das profundidades de 0 a 10; 10 a 20; 20 a 40 e 40 a 60 cm.

O número total de amostras indeformadas de solo coletadas foi de 240, sendo que na condição antes do tráfego das máquinas foram coletadas 12 amostras para cada profundidade do solo, no momento após o tráfego do *Harvester* e após o tráfego do *Forwarder* foram coletadas 24 amostras, para cada profundidade.



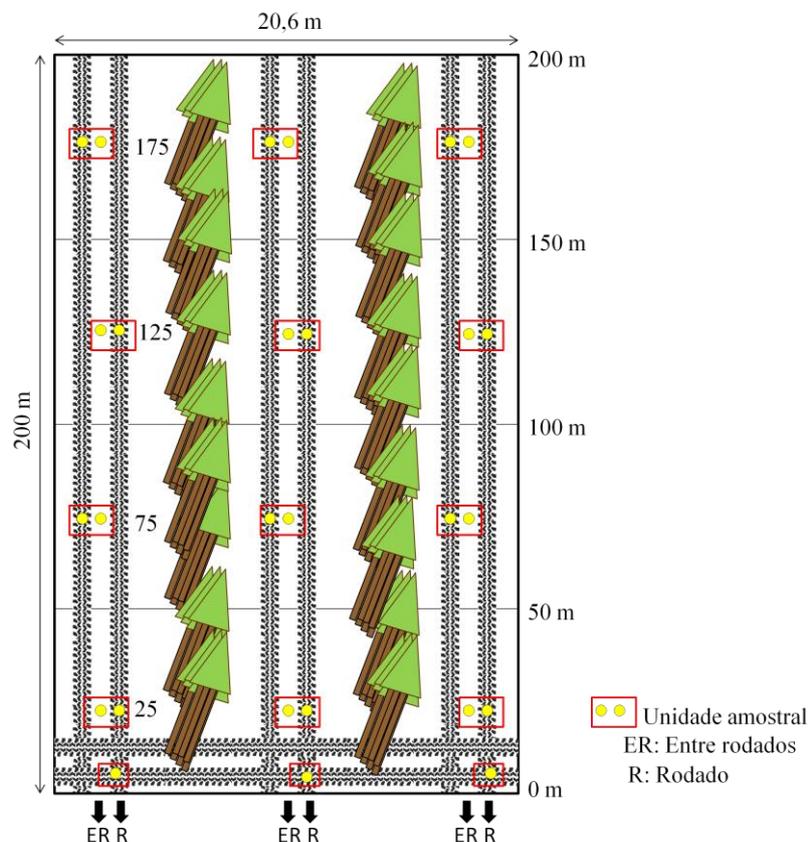
**Figura 2.** Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo na área experimental, nas diferentes distâncias e profundidades do solo no sistema de toras curtas.

## b) Sistema de árvores inteiras

Para o sistema de árvores inteiras foram coletadas amostras indeformadas do solo no esquema semelhante ao sistema anterior: antes do tráfego das máquinas (testemunha), após a passada do *Feller-buncher*, após as passadas do *Skidder* e após a passada do Processador. Para compor a unidade amostral, obteve-se a média dos pontos amostrados nos rodados e entre rodados.

Para a avaliação da compactação do solo causado pelo tráfego das máquinas ao longo da trilha de extração foram retiradas amostras de solo nas distâncias de 25, 75, 125 e 175 metros da margem do talhão, compreendendo as faixas de extração de 0 a 50; 51 a 100; 101 a 150 e 151 a 200 metros, onde ocorreu em média 14, 10, seis e duas passadas do *Skidder*, respectivamente, considerando as situações de viagem vazia e carregada. Retiraram-se amostras nos intervalos das profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm (Figura 3).

Para avaliar o processador, retiraram-se três amostras indeformadas do solo, localizadas nas linhas de rodados da máquina e nas quatro profundidades avaliadas.



**Figura 3.** Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo na área experimental, nas diferentes distâncias e profundidades do solo no sistema de árvores inteiras.

As coletas dos dados foram realizadas nos meses de abril a maio de 2012 no sistema de toras curtas e nos meses de outubro a novembro de 2012 no sistema de árvores inteiras, seguindo o ritmo normal de trabalho da empresa, sem haver nenhuma interferência e sem controle do número de passadas, porém quantificando o número de passadas em operações normais.

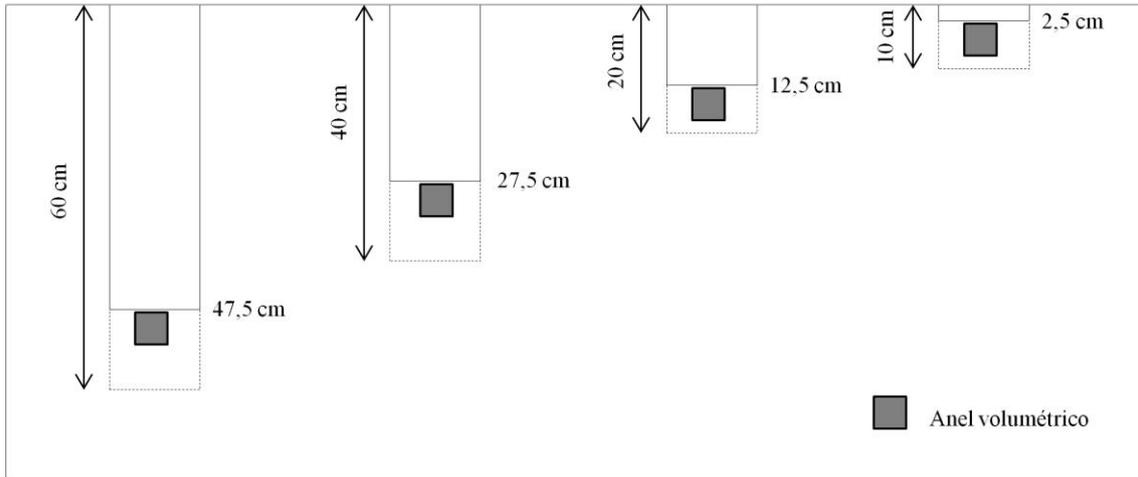
#### 4.4. Parâmetros físicos do solo estudados

##### 4.4.1. Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas, com uso de uma cavadeira e um amostrador de anéis volumétricos de amostras indeformadas (TAI), marca *Soil Control* (Figura 4 a e 4 b), nas profundidades de 0 a 10; 10 a 20; 20 a 40 e 40 a 60 cm, sendo em pontos próximos de modo que não houvesse interferências nas retiradas das amostras (Figura 5). Foram utilizados anéis volumétricos de altura de 5,5 cm e diâmetro interno de 5,0 cm, com volume médio de  $86,35 \text{ cm}^3$ .



**Figura 4.** Abertura das covas com uma cavadeira (a) e coleta das amostras com amostrador volumétrico de amostras indeformadas (TAI) em campo (b).



**Figura 5.** Esquema da coleta de amostras indeformadas do solo nas diferentes profundidades.

Após a coleta, as amostras de solo foram pesadas para obtenção do peso úmido, secas em estufa a 105 °C para obtenção do peso seco, procedendo-se então à determinação da densidade por meio da seguinte expressão (EMBRAPA, 1997).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad (1)$$

Em que:  $D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $M_{ss}$  = massa do solo seco em estufa a 105 °C (Mg); e  $V_s$  = volume do anel volumétrico ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.4.2. Porosidade Total

Para a determinação da porosidade total foi utilizada a equação 2, por meio da densidade das partículas sólidas ( $D_p$ ) que foi determinada pelo método do balão volumétrico, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

$$P_t = \frac{D_p - D_s}{D_p} \quad (2)$$

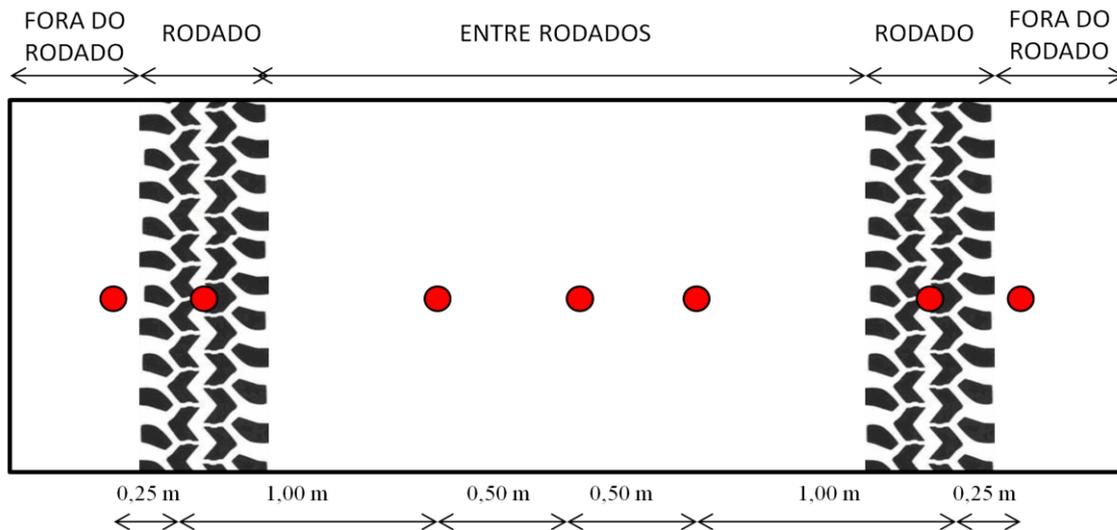
Em que:  $P_t$  = Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $D_p$  = densidade de partículas do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

### 4.4.3. Resistência do Solo à Penetração

#### 4.4.3.1. Perfil transversal

Para a determinação da resistência do solo à penetração (RP) foi utilizado um penetrômetro eletrônico digital, da marca *Eijkelkamp* e modelo 06.15.SA, equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de  $60^\circ$  e base de  $1 \text{ cm}^2$  (11,28 mm de diâmetro nominal), com a velocidade de penetração máxima de  $2 \text{ cm s}^{-1}$ , obtendo diretamente os valores de RP na unidade de Mega Pascal (MPa).

As avaliações de resistência do solo à penetração foram realizadas em sete pontos amostrais, em diferentes posições transversais à trilha de extração dos rodados das máquinas, com distâncias conhecidas, por meio de uma fita métrica, até a profundidade de 60 cm (Figura 6).

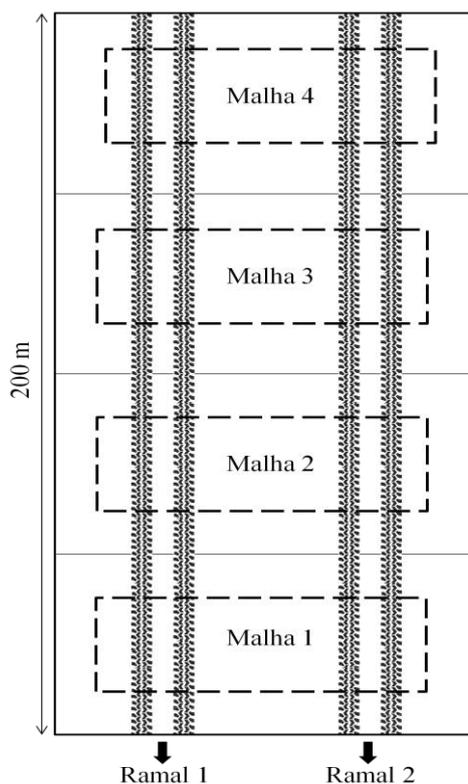


**Figura 6.** Esquema das medições de resistência à penetração em relação à trilha de tráfego das máquinas de colheita de madeira.

#### 4.4.3.2. Malha penetrométrica horizontal

Após realizadas as operações de colheita de madeira em cada classe de distância (0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m) foram construídas quatro malhas retangulares, que possuía 150 pontos de resistência do solo à penetração, sendo 15 pontos na coordenada X, nas distâncias 0,0; 2,0; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 7,5; 9,0; 10,5; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 16,0; 18,0 m, abrangendo dois ramais de extração e 10 pontos na

coordenada Y, que se distanciavam a cada metro (Figura 7). Foi mensurada a RP até a profundidade de 60 cm.



**Figura 7.** Croqui da alocação das malhas ao longo da trilha de extração de madeira.

#### 4.5. Análise estatística

Para responder aos três objetivos propostos pelo trabalho, as análises foram feitas para cada parâmetro físico do solo estudado, sendo todos os resultados obtidos antes e após as operações de colheita de madeira, submetidos ao teste de normalidade e as médias comparadas entre tratamentos e entre profundidades, dentro do sistema, pelo teste de DMS de Fisher (Teste  $t$  múltiplo) ao nível de 95 % de probabilidade.

Em seguida, seccionou-se a área em classes de distância (0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m), para avaliar a compactação causada pela atividade de extração de madeira, devido as diferentes intensidades de tráfego ocorridas na área, sendo os resultados novamente comparados pelo teste de DMS de Fisher (Teste  $t$  múltiplo).

Para os valores obtidos pela amostra indeformada, como a densidade do solo e a porosidade total, considerou como unidade amostral os pontos obtidos nas posições de rodado e entre rodados, visto não apresentar diferença significativa, enquanto que para o parâmetro resistência do solo à penetração, separaram-se os valores em posições onde

foram obtidos os dados (rodados, entre rodados e fora dos rodados), devido à facilidade da sua coleta, sendo possível a realização da confecção dos mapas transversais em isolinhas.

Por fim, realizou-se a elaboração dos mapas temáticos horizontais para todos os parâmetros físicos avaliados nas quatro profundidades e para todos os tratamentos, onde foi utilizado o programa *Surfer* 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2010) com base nos valores estimados por krigagem e dos parâmetros dos semivariogramas ajustados, realizados com o programa GS+ (ROBERTSON, 1998). E para quantificar os percentuais (%) de área referentes a cada classe das variáveis foi utilizado o programa Idrisi Taiga (EASTMAN, 2009). Desta forma, foi possível identificar as zonas homogêneas, assim como, localizar e mensurar as áreas mais afetadas pelo tráfego das máquinas.

Para a confecção dos mapas temáticos da densidade do solo e porosidade total considerou-se a distância de 25 m como ponto zero, devido aos melhores ajustes obtidos. Os mapas de RP foram seccionados em classes de distância devido ao maior número de pontos amostrais obtidos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Sistema de Toras Curtas

#### 5.1.1. Caracterização do solo da área estudada

O solo da área trafegada pelo sistema de toras curtas apresentou uma quantidade média de areia total de  $672 \text{ kg kg}^{-1}$ , com  $62 \text{ kg kg}^{-1}$  de silte e  $266 \text{ kg kg}^{-1}$  de argila. É possível observar uma redução da quantidade de areia total e aumento da quantidade de argila em profundidade (Tabela 3).

O carbono orgânico presente no solo foi decrescente em profundidade, variando de  $11,66 \text{ kg kg}^{-1}$  na camada de 0 a 10 cm, a  $9,72 \text{ kg kg}^{-1}$  na camada de 40 a 60 cm.

**Tabela 3.** Granulometria média, carbono orgânico do solo e umidade gravimétrica nas profundidades avaliadas.

Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina	Areia total ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Silte	Argila	CO ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Ug ( $\text{kg kg}^{-1}$ )
Sistema de toras curtas (Agronomia)							
0 a 10	289	405	694	62	244	11,66	0,35
10 a 20	227	454	681	56	263	11,27	0,32
20 a 40	253	408	661	63	276	9,33	0,35
40 a 60	239	414	653	68	279	9,72	0,36
<b>Média</b>	<b>252</b>	<b>420</b>	<b>672</b>	<b>62</b>	<b>266</b>	<b>10,50</b>	<b>0,35</b>

CO: Carbono Orgânico; Prof.: Profundidade; Ug: Umidade gravimétrica.

#### 5.1.2. Parâmetros físicos do solo

##### 5.1.2.1. Densidade do solo

Na Tabela 4, encontram-se os resultados da densidade do solo, nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita de madeira (AT), após o tráfego do *Harvester* (HV) e após o tráfego do *Forwarder* (HV + FW).

**Tabela 4.** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do *Harvester* (HV) e após as passadas do *Forwarder* (HV + FW) nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV(%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	<b>Ds (<math>\text{Mg m}^{-3}</math>)</b>							
<b>AT</b>	1,58 C a ( $\pm 0,05$ )	1,59 C a ( $\pm 0,03$ )	1,59 C a ( $\pm 0,02$ )	1,59 C a ( $\pm 0,04$ )	1,59	0,413 <sup>ns</sup>	0,029	2,25
<b>HV</b>	1,71 B a ( $\pm 0,09$ )	1,72 B a ( $\pm 0,09$ )	1,72 B a ( $\pm 0,08$ )	1,71 B a ( $\pm 0,06$ )	1,72	0,316 <sup>ns</sup>	0,047	4,78
<b>HV + FW</b>	1,91 A a ( $\pm 0,06$ )	1,89 A a ( $\pm 0,07$ )	1,85 A ab ( $\pm 0,05$ )	1,84 A b ( $\pm 0,09$ )	1,87	5,167 <sup>**</sup>	0,137	3,68
<b>Valor F</b>	85,38 <sup>**</sup>	76,44 <sup>**</sup>	77,56 <sup>**</sup>	45,61 <sup>**</sup>				
<b>DMS</b>	0,14	0,14	0,12	0,14				
<b>CV (%)</b>	4,09	4,15	3,63	4,05				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, HV: Após a passada do *Harvester*, HV + FW: Após as passadas do *Forwarder*) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Ds: Densidade do solo; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Observa-se que na área colhida pelo sistema de toras curtas, a densidade do solo na condição antes do tráfego das máquinas apresentou uma média de  $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo este valor semelhante nas quatro profundidades avaliadas. Essa similaridade na densidade do solo em profundidade se atribui ao aumento do teor de argila em profundidade, variando de  $244 \text{ kg kg}^{-1}$  na camada de 0 a 10 cm a  $279 \text{ kg kg}^{-1}$  na camada de 40 a 60 cm. Além disso, pode ter sido causada pela redução do carbono orgânico em profundidade.

Após o tráfego do *Harvester*, a densidade do solo se alterou logo após uma passada da máquina, com um incremento médio de 8,2 % em relação à testemunha. Nota-se que as médias apresentaram diferença significativa com relação à densidade inicial do solo, porém não se diferiram entre as profundidades avaliadas.

Após o tráfego do *Forwarder*, os valores médios de densidade do solo diferiram significativamente dos tratamentos antes e após o tráfego do *Harvester* em todas as camadas avaliadas. As camadas superficiais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm) não apresentaram diferença significativa entre elas, com um incremento médio de 20,3 e 18,9 %, respectivamente, com relação à testemunha. Nas camadas subsuperficiais (20 a 40 e 40 a 60 cm), o incremento médio foi de 16,9 e 15,1 %, sem diferença significativa entre as camadas.

Para Geise et al., (1989) um incremento acima de 15 % em relação a densidade inicial do solo corresponde a densidade crítica ao desenvolvimento de espécies arbóreas. Desta maneira, é possível afirmar que todas as profundidades avaliadas no tratamento

após o tráfego do *Forwarder* atingiram a densidade crítica. Porém, conforme proposto por Reinert et al., (2006), para um solo com teor médio de argila de  $266 \text{ g kg}^{-1}$ , presente na área de estudo, a densidade crítica é de  $1,87 \text{ Mg m}^{-3}$  e a densidade restritiva de  $2,05 \text{ Mg m}^{-3}$ . Portanto, pode-se dizer que apenas as camadas superficiais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm) após o tráfego do *Forwarder*, atingiram a densidade crítica ao desenvolvimento das plantas.

Ao considerar outros trabalhos realizados, que tentaram definir o limite de densidade para o desenvolvimento das plantas, nota-se, que as camadas superficiais do solo, após o tráfego do *Forwarder*, ultrapassaram tais valores. Para Camargo e Alleoni (1997), os solos de textura franco-argilosa a argilosa, a densidade crítica é em torno de  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  e para solos arenosos a franco-arenosos é em torno de  $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ . Gent et al. (1984) consideraram que para espécies florestais de rápido crescimento, os valores de  $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$  como limitantes em solos de textura argilosa na camada de 0 a 15 cm, sendo que, para a camada de 10 a 25 cm, os valores próximos de  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$  cessam o crescimento de raízes.

De acordo com Hadas (1994) *apud* Pezzoni Filho (2011), pode-se dizer que a carga por eixo do *Forwarder* durante o experimento não excedeu o limite de carga, pois a maior compactação do solo ocorreu nas camadas superficiais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm). Segundo o autor, a compactação do solo que permanece confinada na zona superficial, que é causada por elevadas cargas por eixo ou por utilizar pressão do pneu que tenha contato baixo ou médio com o solo, independente da carga por eixo, caso contrário, as altas cargas por eixo aumentam o volume de solo e profundidade afetada pela compactação.

Os resultados obtidos, ao avaliar a densidade do solo na condição antes do tráfego das máquinas e após as operações de colheita de madeira, evidenciaram que a mecanização florestal na colheita de madeira é a principal causa da compactação dos solos de uso florestal. Porém, deve se destacar a grande importância de conhecer a localização espacial da compactação ao longo do talhão após a realização de todas as operações de colheita e madeira, pois esta é a condição física do solo manejada para reforma do povoamento. Portanto, classificar a distância de extração, abrangendo as diferentes intensidades de tráfego que ocorrem ao longo do talhão, permite conhecer os locais críticos de compactação na área, e assim, planejar o manejo do solo de acordo com a intensidade necessária.

Na Tabela 5 são apresentados os dados da densidade do solo ao longo da trilha de extração, que correspondem às classes de distância de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m, após realizadas todas as atividades de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas.

**Tabela 5.** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas.

Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	<b>Ds (<math>\text{Mg m}^{-3}</math>)</b>							
<b>0 a 50</b>	1,95 A a ( $\pm 0,05$ )	1,89 A ab ( $\pm 0,06$ )	1,87 A b ( $\pm 0,05$ )	1,87 A b ( $\pm 0,07$ )	1,89	2,63*	0,067	2,94
<b>51 a 100</b>	1,92 A a ( $\pm 0,08$ )	1,88 A a ( $\pm 0,08$ )	1,88 A a ( $\pm 0,06$ )	1,89 A a ( $\pm 0,03$ )	1,89	0,70 <sup>ns</sup>	0,082	3,59
<b>101 a 150</b>	1,89 A a ( $\pm 0,06$ )	1,90 A a ( $\pm 0,03$ )	1,83 AB b ( $\pm 0,02$ )	1,84 AB ab ( $\pm 0,12$ )	1,87	3,72*	0,052	2,29
<b>151 a 200</b>	1,89 A a ( $\pm 0,05$ )	1,87 A ab ( $\pm 0,09$ )	1,80 B b ( $\pm 0,05$ )	1,77 B b ( $\pm 0,06$ )	1,83	3,16*	0,095	4,30
<b>Média</b>	1,91	1,89	1,85	1,84				
<b>Valor F</b>	1,34 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	1,88 <sup>ns</sup>	4,05*				
<b>DMS</b>	0,06	0,07	0,08	0,07				
<b>CV (%)</b>	2,81	3,26	3,82	3,49				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha=0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Ds: Densidade do solo; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

As médias da densidade do solo para todas as classes de distâncias nas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm) não apresentaram diferença significativa, com uma média variando 1,89 a 1,95  $\text{Mg m}^{-3}$  na camada de 0 a 10 cm, e de 1,87 a 1,90  $\text{Mg m}^{-3}$  na camada de 10 a 20 cm. Isto demonstra que apesar de haver variabilidade da intensidade de tráfego ao longo da trilha de extração, sendo a maior intensidade de tráfego na distância de 0 a 50 m, com uma passada do *Harvester* e 20 passadas do *Forwarder*, e a menor intensidade na distância de 151 a 200 m, com uma passada do *Harvester* e seis passadas do *Forwarder*. Isto evidencia que a compactação máxima é atingida logo nas primeiras passadas das máquinas.

A compactação do solo se comportou de forma semelhante, estando em acordo com Jorajuria e Draghi (2000), que relatam que 90 % do incremento máximo medido para a densidade do solo na camada superficial (0 a 30 cm) foi produzido já na primeira passada de um trator de porte leve. Entretanto, as camadas subsuperficiais do solo (20 a 40 e 40 a 60 cm) apresentaram diferença significativa entre as classes de distâncias avaliadas, sendo os maiores valores de densidade do solo nas classes de 0 a 50 e 51 a

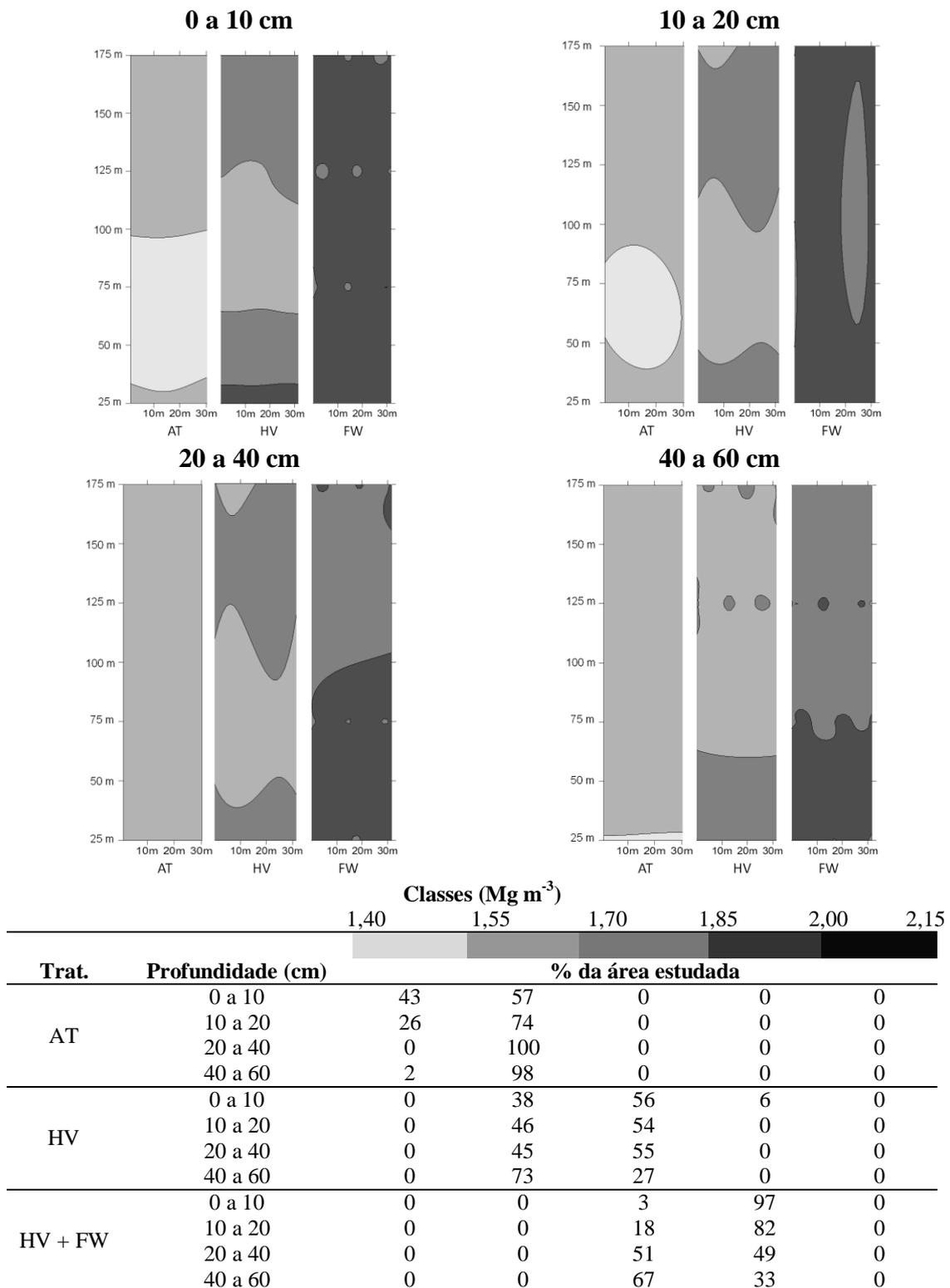
100 m, com um valor médio de densidade de  $1,87 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada de 20 a 40 cm e de  $1,87$  e  $1,89 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada de 40 a 60 cm.

Portanto, pode-se dizer que a compactação do solo foi semelhante para as diferentes intensidades de tráfego nas duas camadas superficiais, e com o aumento do número de passadas das máquinas, a compactação atingiu maiores profundidades, sendo estas localizadas nas distâncias de 0 a 100 metros da margem do talhão.

Desta maneira, os resultados obtidos entram em acordo com Reichert et al., (2007), que afirmam que a profundidade da compactação do solo pode variar por diversas razões, como as especificações das máquinas e seu rodados, condições do solo, número de passadas, histórico de pressões e o tipo de manejo aplicado ao solo, porém, em áreas florestais, a compactação atinge maiores profundidades em decorrência do maior peso e intensidade de tráfego das máquinas.

Os mapas de densidade do solo confeccionados pelas técnicas de geoestatística mostram a variabilidade espacial deste parâmetro ao longo do talhão nos tratamentos antes do tráfego, após o tráfego do *Harvester* e após o tráfego do *Forwarder*, nas diferentes camadas do solo avaliadas (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm) (Figura 8).

Como pode ser visto, a área experimental antes da ocorrência do tráfego apresentava densidade do solo predominante na classe de  $1,55$  a  $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$  em todas as camadas do solo avaliadas. Após o tráfego do *Harvester*, ocorreram alterações da densidade do solo na área, sendo a classe predominante de  $1,70$  a  $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$ . Após o tráfego do *Forwarder*, as camadas superficiais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm) apresentaram homogeneidade na densidade do solo ao longo do talhão, sendo 97 e 82 % dentro da classe de  $1,85$  a  $1,99 \text{ Mg m}^{-3}$ , nas respectivas camadas, enquanto que as camadas subsuperficiais (20 a 40 e 40 a 60 cm), apresentaram predomínio na classe de  $1,70$  a  $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$ , com uma zona homogênea, dentro da classe de  $1,85$  a  $1,99 \text{ Mg m}^{-3}$ , localizada próxima à margem do talhão.



**Figura 8.** Mapas da distribuição espacial da densidade do solo  $D_s$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) nas diferentes profundidades, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do *Harvester* (HV) e após tráfego do *Forwarder* (HV + FW).

Pode-se dizer que as primeiras passadas das máquinas foram responsáveis pela compactação do solo nas camadas superficiais, enquanto o incremento da densidade do solo foi crescente com o aumento do número de passadas das máquinas nas camadas subsuperficiais (20 a 40 e 40 a 60 cm).

Este efeito do número de passadas das máquinas foi comprovado em muitos estudos, os quais concluíram que o tráfego repetido em uma mesma área provoca danos à estrutura do solo, sendo que, em geral, as primeiras passadas são consideradas as mais impactantes (SEIXAS et al., 2003; AMPOORTER et al., 2007; SAMPIETRO, 2010).

Geralmente, isso ocorre, pois as primeiras passadas das máquinas são responsáveis por aplicarem pressões no solo superior à carga suporte, e conseqüentemente, alteram as suas propriedades físicas, como a porosidade e a densidade do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Logo, a resistência aumenta com a compactação, e assim, aumenta a carga suporte do solo (VANDENBERG; GILL, 1962). Conseqüentemente, o maior número de passadas das máquinas sobre o solo ocasionaram menores alterações na estrutura do solo, até que as pressões aplicadas não exerçam o aumento da capacidade de suporte de carga.

#### **5.1.2.2. Porosidade total**

A porosidade total do solo foi um parâmetro físico que também apresentou sensibilidade às alterações provocadas pelo tráfego das máquinas de colheita de madeira. Como pode ser visto na Tabela 6, os valores decresceram com o aumento de tráfego das máquinas.

A porosidade total antes do tráfego das máquinas era em média de  $0,460 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em todas as profundidades avaliadas. Após a passada do *Harvester*, o valor médio reduziu para  $0,417 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , correspondendo a uma redução de 9,4 %, apresentando diferença significativa entre tratamentos.

Após o tráfego do *Forwarder*, nota-se que a porosidade total decresceu com relação ao tratamento após *Harvester*, apresentando uma média de  $0,355$  e  $0,356 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  nas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm), que correspondem aos maiores valores de redução em relação à condição inicial do solo de 23,2 e 22,6 %, e nas camadas subsuperficiais (20 a 40 e 40 a 60 cm) com uma média de  $0,367$  e  $0,378 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com reduções de 20,2 e 17,1 %, respectivamente.

**Tabela 6.** Valores médios de porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do *Harvester* (HV) e após as passadas do *Forwarder* (HV + FW) e nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	Pt ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )							
AT	0,462 A a ( $\pm 0,02$ )	0,460 A a ( $\pm 0,01$ )	0,460 A a ( $\pm 0,01$ )	0,456 A a ( $\pm 0,01$ )	0,460	0,413 <sup>ns</sup>	0,025	2,65
HV	0,419 B a ( $\pm 0,03$ )	0,414 B a ( $\pm 0,03$ )	0,414 B a ( $\pm 0,03$ )	0,419 B a ( $\pm 0,02$ )	0,417	0,316 <sup>ns</sup>	0,055	6,69
HV + FW	0,355 C b ( $\pm 0,02$ )	0,356 C b ( $\pm 0,02$ )	0,367 C a ( $\pm 0,02$ )	0,378 C a ( $\pm 0,03$ )	0,364	5,17 <sup>**</sup>	0,047	6,43
Valor F	85,39 <sup>**</sup>	76,44 <sup>**</sup>	77,56 <sup>**</sup>	45,62 <sup>**</sup>				
DMS	0,049	0,049	0,043	0,048				
CV (%)	6,08	6,22	5,34	5,81				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, HV: Após a passada do *Harvester*, HV + FW: Após as passadas do *Forwarder*) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Pt: Porosidade total; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Assim como a densidade do solo, a porosidade total foi mais afetada nas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm), ocasionado, segundo Cechin (2007), à existência de uma relação direta e negativa entre a densidade do solo e a porosidade total.

Prevedello (1996) afirma que apesar de haver uma grande variação em relação à porosidade total dos solos devido à textura, matéria orgânica e compactação, pode-se dizer que para solos arenosos, a porosidade total varia de 0,350 a 0,500  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , para solos argilosos, varia de 0,400 a 0,650  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , enquanto que para solos francos a porosidade total é intermediária. Sendo assim, a passada do *Forwarder* proporcionou menor porosidade total nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm que pode ser considerada adequada, devido a sua classe textural.

A fim de verificar a influência da intensidade do tráfego das máquinas que compõe o sistema de toras curtas ao longo do talhão, a Tabela 7 mostra que a porosidade total do solo se comportou de forma semelhante à densidade do solo, sendo a compactação mais intensa em profundidade, onde houve maior intensidade de tráfego.

É possível observar que nas duas primeiras camadas do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm) a porosidade total não apresentou diferença significativa ao longo da trilha de extração, variando de 0,343 a 0,361  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na primeira camada, e de 0,358 a 0,371  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na segunda camada. As camadas mais profundas do solo (20 a 40 e 40 a 60 cm) apresentaram maior variabilidade, diferindo as classes de distâncias que sofreram maior intensidade de tráfego das classes com menores intensidades. Estes

efeitos são semelhantes aos encontrados no estudo realizado por Sampietro (2010), que ao avaliar a influência da intensidade de tráfego, constatou que o maior número de passadas das máquinas atingem maiores profundidades.

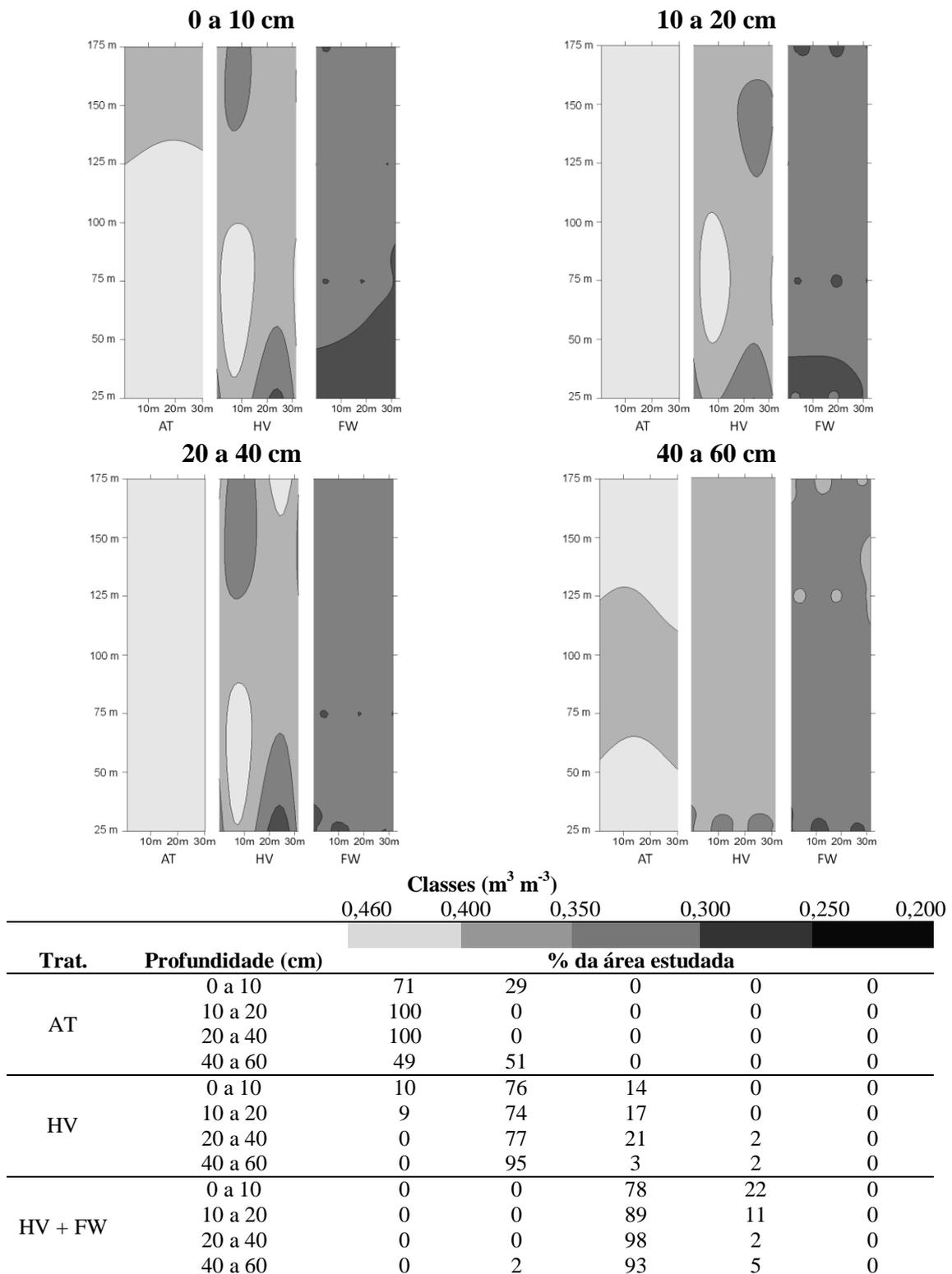
**Tabela 7.** Valores médios de porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas.

Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	Pt ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )							
<b>0 a 50</b>	0,343 A b ( $\pm 0,008$ )	0,358 A ab ( $\pm 0,020$ )	0,364 AB a ( $\pm 0,017$ )	0,363 B a ( $\pm 0,024$ )	0,357	2,63*	0,023	5,34
<b>51 a 100</b>	0,351 A a ( $\pm 0,026$ )	0,362 A a ( $\pm 0,026$ )	0,360 B a ( $\pm 0,020$ )	0,357 B a ( $\pm 0,010$ )	0,358	0,70 <sup>ns</sup>	0,029	6,50
<b>101 a 150</b>	0,361 A b ( $\pm 0,019$ )	0,356 A b ( $\pm 0,012$ )	0,377 AB a ( $\pm 0,006$ )	0,372 AB ab ( $\pm 0,042$ )	0,367	3,72*	0,018	3,99
<b>151 a 200</b>	0,361 A b ( $\pm 0,018$ )	0,371 A ab ( $\pm 0,030$ )	0,389 A a ( $\pm 0,016$ )	0,398 A a ( $\pm 0,021$ )	0,380	3,16*	0,032	7,07
<b>Média</b>	0,0354	0,362	0,373	0,373				
<b>Valor F</b>	2,68 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	3,72*	3,16*				
<b>DMS</b>	0,022	0,025	0,029	2,65				
<b>CV (%)</b>	5,28	5,75	6,43	5,88				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Pt: Porosidade total; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Os mapas de porosidade total apresentam a distribuição da variabilidade espacial deste parâmetro, de tal forma que é possível identificar as zonas homogêneas, e quantificá-las nas condições antes do tráfego das máquinas, após o tráfego do *Harvester* e após o tráfego do *Forwarder* e nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm (Figura 9).

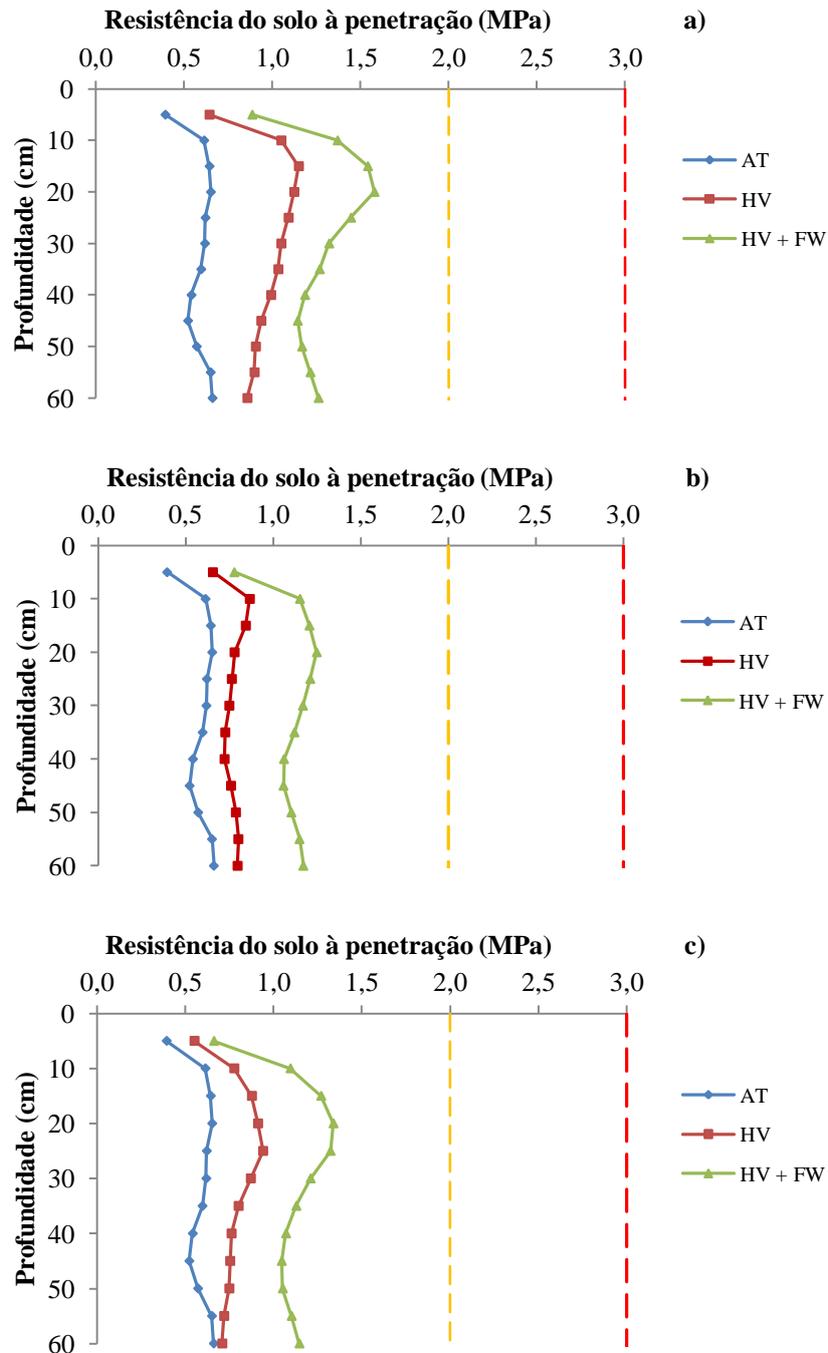
Na condição antes do tráfego das máquinas nas três primeiras camadas, a área apresentou maior percentual na classe inicial de 0,460 a 0,401  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e na camada mais profunda de 0,400 a 0,351  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Após o tráfego do *Harvester*, todas as camadas apresentaram alterações, sendo a classe 0,400 a 0,351  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  a que apresentou predominância na área. Logo, após o tráfego do *Forwarder* (FW), as alterações foram mais evidentes, apresentando uma acentuada redução da porosidade total na região onde ocorreu o maior número de passadas das máquinas, correspondendo a 22 e 11 % da área na classe 0,300 a 0,251  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , nas camadas superficiais, o restante da área se apresentou na classe de 0,350 a 0,301  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ .



**Figura 9.** Mapas da distribuição espacial da porosidade total do solo  $P_t$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) nas diferentes profundidades, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do *Harvester* (HV) e após tráfego do *Forwarder* (FW).

### 5.1.2.3. Resistência do solo à penetração

A Figura 10 mostra a resistência do solo à penetração nos diferentes tratamentos avaliados, contemplando a condição antes do tráfego das máquinas (AT), após o tráfego do *Harvester* (HV) e após o tráfego do *Forwarder* (FW), nas posições de mensuração da RP.



**Figura 10.** Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes condições de tráfego no sistema de toras curtas. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados (FR); Linha tracejada laranja = RP crítica; Linha tracejada vermelha = RP restritiva.

É possível notar que os valores de resistência do solo à penetração foram maiores na posição da linha de rodados (RD) (Figura 10a), em comparação com as demais posições. Nesta posição, após a passada do *Harvester* (HV) houve um incremento na resistência do solo em relação à condição antes do tráfego das máquinas, sendo crescente após o tráfego do *Forwarder* (FW). Percebe-se que os valores médios de RP não ultrapassaram o valor crítico ao desenvolvimento das plantas, de 2 MPa (LAPEN et al., 2004). O mesmo ocorre nas demais posições, onde a compactação se apresentou com menor intensidade.

A Tabela 8 apresenta os valores médios da resistência do solo à penetração nas três condições de tráfego e nas posições mensuradas. Nota-se que a RP foi crescente com o aumento do tráfego das máquinas. Na primeira camada do solo (0 a 10 cm), na posição RD, antes do tráfego das máquinas, a média de RP era de aproximadamente 0,493 MPa, e após a passada do *Harvester* a RP aumentou 67,9 %, com uma média de 0,828 MPa, apresentando diferença significativa. A camada de 10 a 20 cm apresentou um incremento de 75,6 %, e as camadas mais profundas do solo apresentaram um incremento de 75,4 % e 49,8 %.

Após as passadas do *Forwarder*, a camada de 0 a 10 cm apresentou um incremento da RP de 124,1 %, enquanto que a camada de 10 a 20 cm apresentou o maior incremento, representando 140,9 %. Na camada de 20 a 40 e 40 a 60 cm, os incrementos da RP foram menores, com 119,7 e 99,5 %, respectivamente.

Na posição entre rodados (ER), os valores da RP sofreram menores incrementos após o tráfego do *Harvester*, sendo a camada superficial do solo (0 a 10 cm) a que mais sofreu alterações, com um incremento de 52,3 %, enquanto que nas camadas de 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, apresentaram um incremento de 25,4, 24,2, 30,8 %, respectivamente. Após o tráfego do *Forwarder*, a camada de 0 a 10 cm, apresentou um incremento de 92,3 % em relação à condição inicial do solo, com uma média de 0,948 MPa. Na camada de 10 a 20 cm o incremento foi em torno de 86,8 %, sendo esta a camada que apresentou maior valor de RP, com 1,228 MPa. Na camada de 20 a 40 cm, o incremento foi de 92,1 % e na camada de 40 a 60 cm, de 86,8 %, que correspondem a uma RP média de 1,141 e 1,121 MPa, respectivamente.

Na posição fora dos rodados (FR), o aumento da resistência do solo a penetração foi menor que a posição RD. Após a passada do *Harvester*, a camada superficial apresentou um incremento de 32,5 %, sendo crescente até a profundidade de 20 a 40 cm, com um incremento de 41,9 %. A camada subsuperficial (40 a 60 cm) foi a

menos impactada, com um incremento de 22,0 % em relação à condição inicial do solo. Após o tráfego do *Forwarder*, a camada superficial apresentou um incremento de 74,0 %, apresentando o maior incremento na camada de 10 a 20 cm, com 101,4 %, sendo decrescente nas camadas inferiores (20 a 40 e 40 a 60 cm), com incrementos de 98,7 e 81,0 %, respectivamente.

**Tabela 8.** Valores médios de resistência do solo à penetração RP (MPa) antes do tráfego (AT), após passada do *Harvester* (HV) e após as passadas do *Forwarder* (FW) e nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
<b>RP (MPa)</b>								
<b>Linha dos rodados</b>								
AT	0,493 C b (±0,154)	0,647 C a (±0,007)	0,594 C a (±0,034)	0,600 C a (±0,067)	0,584	7,58**	0,156	13,28
HV	0,828 B c (±0,280)	1,136 B a (±0,025)	1,042 B b (±0,039)	0,899 B c (±0,034)	0,976	15,83**	0,243	12,49
HV + FW	1,105 A c (±0,374)	1,559 A a (±0,157)	1,305 A b (±0,205)	1,197 A c (±0,205)	1,292	17,44**	0,311	12,20
<b>Valor F</b>	15,79**	209,21**	145,16**	105,84**				
<b>DMS</b>	0,667	0,262	0,335	0,339				
<b>CV (%)</b>	34,88	9,77	14,83	16,36				
<b>Entre rodados</b>								
AT	0,493 C b (±0,154)	0,647 C a (±0,007)	0,594 C a (±0,034)	0,600 C a (±0,067)	0,584	7,58**	0,156	13,28
HV	0,751 B ab (±0,174)	0,811 B a (±0,039)	0,738 B b (±0,020)	0,785 B ab (±0,021)	0,771	2,50*	0,153	9,92
HV + FW	0,948 A c (±0,286)	1,228 A a (±0,214)	1,141 A ab (±0,181)	1,121 A b (±0,165)	1,111	10,84**	0,235	10,54
<b>Valor F</b>	14,92**	54,90**	138,93**	136,36**				
<b>DMS</b>	0,507	0,355	0,983	0,274				
<b>CV (%)</b>	30,27	16,70	15,21	14,15				
<b>Fora dos rodados</b>								
AT	0,493 B b (±0,154)	0,647 C a (±0,007)	0,594 C a (±0,033)	0,600 C a (±0,067)	0,584	7,58**	0,156	13,28
HV	0,653 B c (±0,154)	0,893 B a (±0,027)	0,843 B a (±0,072)	0,732 B b (±0,022)	0,780	23,32**	0,157	10,04
HV + FW	0,858 A d (±0,287)	1,303 A a (±0,215)	1,180 A b (±0,237)	1,086 A c (±0,180)	1,107	22,03**	0,268	12,04
<b>Valor F</b>	10,48**	64,37**	81,36**	107,09**				
<b>DMS</b>	0,504	0,357	0,391	0,298				
<b>CV (%)</b>	33,07	15,84	19,24	15,94				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, HV: Após a passada do *Harvester*, HV + FW: Após as passadas do *Forwarder*) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; RP: Resistência do solo à penetração; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Verificou-se que a compactação foi menor nas posições próximas à linha de passagem das máquinas, comparadas à posição da linha de rodados (RD). Este efeito, para Wronski (1984), pode ser atribuído ao movimento lateral do solo abaixo da zona de

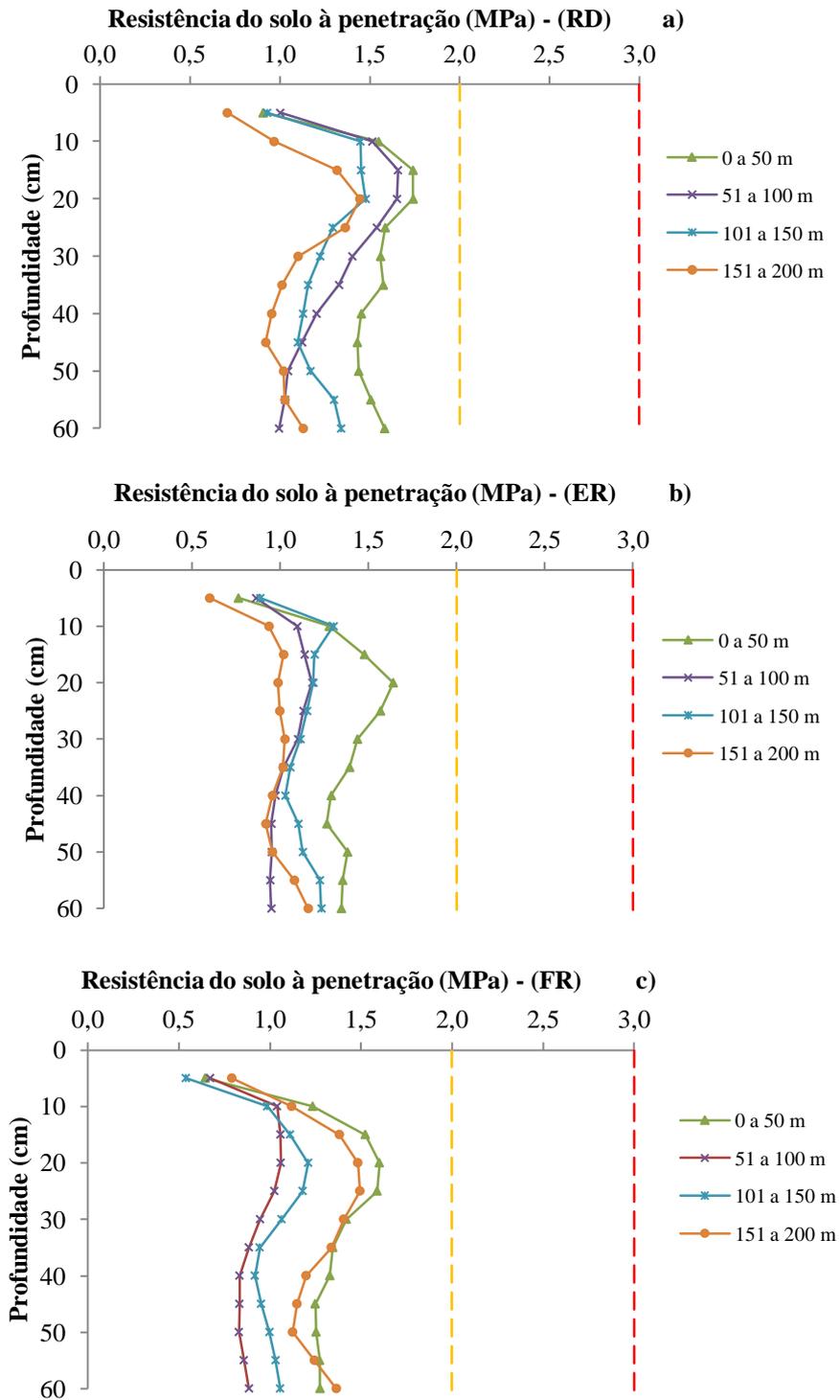
compressão máxima. Esta força vertical, associada ao peso da máquina, exerce também uma pressão horizontal nas camadas do solo, acarretado pelo tráfego dos rodados das máquinas.

O estudo da variabilidade espacial da compactação do solo ao longo da trilha de extração de madeira tem grande importância para subsidiar o planejamento de preparo do solo após a realização da colheita de madeira. Portanto, na Figura 11 e Tabela 9 são apresentados os valores médios de resistência à penetração nas classes de distância de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m e nas diferentes posições avaliadas.

Na posição da linha dos rodados (RD), a camada de 10 a 20 e 20 a 40 cm apresentou os maiores valores médios decrescentes ao longo da trilha de extração, apresentando diferença significativa. Na camada subsuperficial (40 a 60 cm), a classe de distância de 0 a 50 m, apresentou o maior valor médio, seguido da classe de 101 a 150 m, as demais classes, 51 a 100 e 151 a 200 m, não apresentaram diferença significativa, sendo estas as que sofreram menores efeitos do tráfego das máquinas, com os menores valores de RP.

O efeito decrescente da compactação ao longo da trilha de extração também pode ser verificado na posição entre rodados (ER). Na camada de 0 a 10 cm, as distâncias de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 m não apresentaram diferença significativa, enquanto que a classe de 151 a 200 m, não apresentou diferença da classe de 51 a 100 m. Na camada de 10 a 20 cm, o maior valor encontrado de RP foi na distância de 0 a 50 m, enquanto que nas distâncias de 51 a 100 e 101 a 150 m, não apresentaram diferença significativa. A camada de 20 a 40 cm se comportou de forma semelhante a anterior, enquanto que a camada mais profunda foi possível visualizar que o maior valor encontrado foi na distância de 0 a 50 m, onde ocorreu maior intensidade de tráfego.

Na posição fora dos rodados (FR), a camada superficial não apresentou diferença significativa ao longo do talhão, apresentando valores médios que variaram de 0,742 a 0,940 MPa. Nas demais camadas do solo foram possíveis visualizar que a maior alteração lateral ocorreu na distância de 0 a 50 m, sendo a camada de profundidade de 10 a 20 cm a mais alterada.



**Figura 11.** Valores médios de resistência à penetração (MPa) para as posições e classes de distâncias, após a atividade de extração de madeira, no sistema de toras curtas. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados (FR); Linha tracejada laranja = RP crítica; Linha tracejada vermelha = RP restritiva.

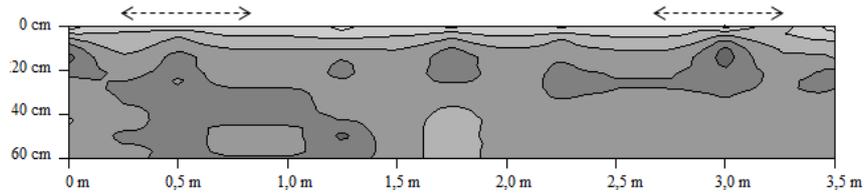
**Tabela 9.** Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão, nas diferentes profundidades e posições avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de toras curtas.

Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
<b>RP (MPa)</b>								
<b>Linha dos rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	1,198 A c (±0,423)	1,741 A a (±0,027)	1,543 A b (±0,071)	1,489 A b (±0,070)	1,493	15,51**	0,373	12,48
<b>51 a 100</b>	1,234 A c (±0,361)	1,653 B a (±0,054)	1,368 B b (±0,129)	1,048 C d (±0,053)	1,325	29,53**	0,346	13,45
<b>101 a 150</b>	1,164 A b (±0,367)	1,464 C a (±0,075)	1,200 C b (±0,072)	1,227 B b (±0,117)	1,264	6,46**	0,351	14,08
<b>151 a 200</b>	0,825 B c (±0,195)	1,381 D a (±0,080)	1,107 D b (±0,175)	1,024 C b (±0,093)	1,084	27,19**	0,288	13,41
<b>Valor F</b>	3,26*	70,72**	51,24**	122,39**				
<b>DMS</b>	0,701	0,355	0,076	0,054				
<b>CV (%)</b>	31,41	35,08	9,20	7,25				
<b>Entre rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	0,996 A c (±0,343)	1,558 A a (±0,105)	1,422 A b (±0,111)	1,336 A b (±0,055)	1,328	23,12**	0,332	12,40
<b>51 a 100</b>	0,968 AB c (±0,198)	1,159 B a (±0,038)	1,056 B b (±0,069)	0,948 D c (±0,010)	1,032	13,44**	0,187	9,15
<b>101 a 150</b>	1,075 A a (±0,298)	1,191 B a (±0,017)	1,088 B a (±0,053)	1,172 B a (±0,083)	1,131	2,48 <sup>ns</sup>	0,275	12,17
<b>151 a 200</b>	0,752 B b (±0,207)	1,003 C a (±0,027)	0,998 C a (±0,034)	1,027 C a (±0,105)	0,945	17,44**	0,217	11,23
<b>Valor F</b>	2,91*	163,89**	138,20**	110,59**				
<b>DMS</b>	0,232	0,053	0,046	0,046				
<b>CV (%)</b>	28,37	4,73	6,36	6,48				
<b>Fora dos rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	0,913 A d (±0,379)	1,562 A a (±0,066)	1,438 A b (±0,120)	1,263 A c (±0,021)	1,294	29,38**	0,347	13,34
<b>51 a 100</b>	0,839 A b (±0,248)	1,059 D a (±0,037)	0,955 C b (±0,112)	0,851 C b (±0,026)	0,926	8,80**	0,230	12,68
<b>101 a 150</b>	0,742 A c (±0,258)	1,160 C a (±0,063)	1,034 C b (±0,127)	1,009 B b (±0,044)	0,986	19,41**	0,263	13,24
<b>151 a 200</b>	0,940 A c (±0,238)	1,432 B a (±0,094)	1,336 B a (±0,198)	1,221 A b (±0,126)	1,232	25,96**	0,291	11,62
<b>Valor F</b>	1,05 <sup>ns</sup>	117,73**	52,51**	156,04**				
<b>DMS</b>	0,246	0,062	0,090	0,043				
<b>CV (%)</b>	33,35	5,23	12,04	6,33				

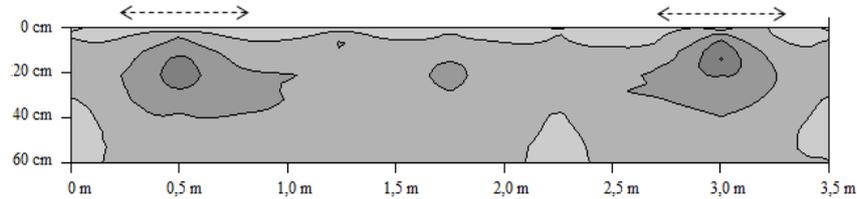
\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; RP: Resistência do solo à penetração; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

A variabilidade da resistência do solo à penetração nas diferentes posições mensuradas pode ser visualizada na Figura 12, onde mostram as alterações significativas no comportamento da RP no perfil transversal do solo, causado pelas diferentes intensidades de tráfego das máquinas que compõe o sistema de toras curtas ao longo da trilha de extração.

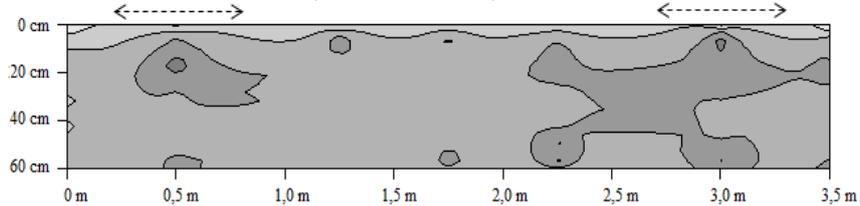
(a) Distância de 0 a 50 m (HV + 20 FW)



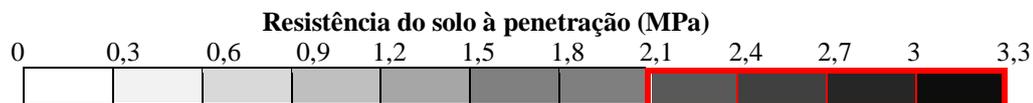
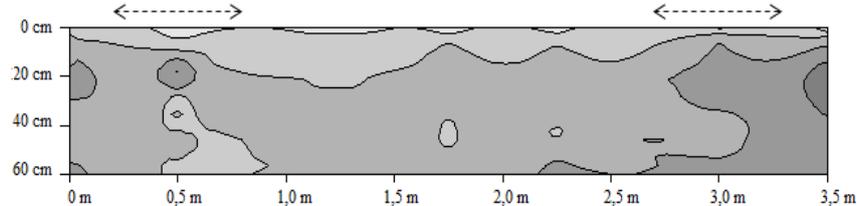
(b) Distância de 51 a 100 m (HV + 16 FW)



(c) Distância de 101 a 150 m (HV + 10 FW)



(d) Distância de 151 a 200 m (HV + 6 FW)



**Figura 12.** Efeitos das classes de distâncias no perfil transversal da resistência do solo à penetração (MPa), no sistema de toras curtas; (a) Distância de 0 a 50 m, (b) Distância de 51 a 100 m, (c) Distância de 101 a 150 m, (d) Distância de 151 a 200 m. A legenda abaixo indica os valores de resistência à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados. Os valores acima de 2,1 MPa destacados são considerados críticos.

As mudanças ocorridas nos valores de RP foram mais acentuadas na zona abaixo dos rodados e nas camadas superficiais do solo. Ao longo da trilha de extração é possível visualizar que na distância de 0 a 50 m, onde ocorreu uma passada do *Harvester* e 20 passadas do *Forwarder* (HV + 20 FW), os incrementos ocorreram na zona abaixo dos rodados como também apresentou efeitos lateralmente no perfil de solo. Estes efeitos também podem ser visualizados nas distâncias de 51 a 100 e 101 a 150 m, porém com menor intensidade. Na distância de 151 a 200 m, onde ocorreu a menor intensidade de tráfego, a RP se apresentou distribuída, tendo maior homogeneidade nas posições da linha do rodado e entre rodados.

Os maiores valores de RP abaixo dos rodados também foram encontrados por Lima et al., (2008), ao avaliar o perfil transversal penetrométrico após o tráfego de máquinas que compõe o sistema de árvores inteiras. Tal fato pode ser explicado pela pressão dos rodados sobre o solo, proporcionando maior diminuição dos espaços vazios neste solo, conseqüentemente, aumenta-se a resistência do solo à penetração.

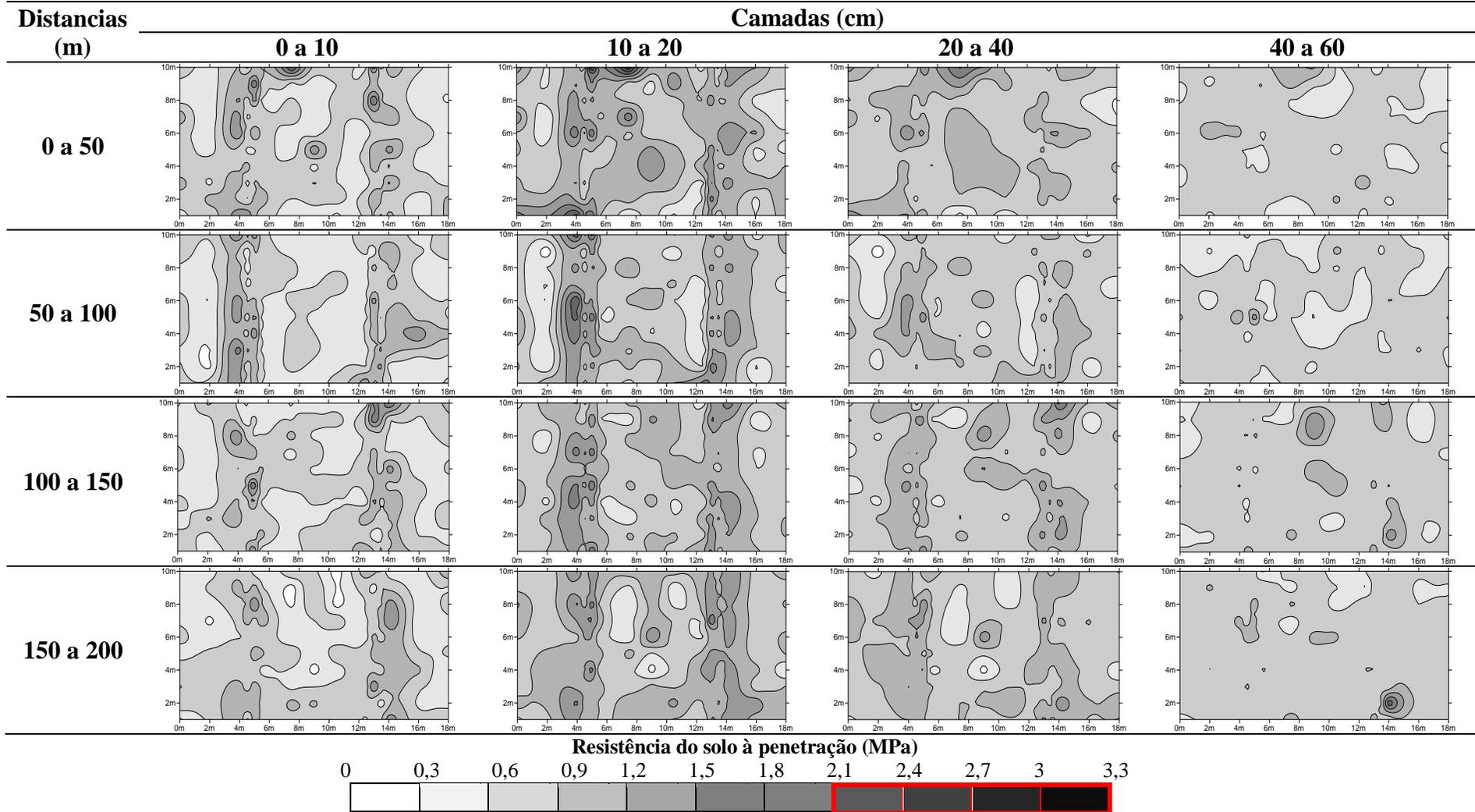
Na Figura 13 é possível visualizar melhor as zonas homogêneas da RP, enquanto na Tabela 10 é possível visualizar os valores percentuais da área, dentro de cada classe de valores de RP.

Observa-se que é possível identificar a área trafegada pelas máquinas nos dois ramais que foram mensuradas a resistência do solo à penetração. A compactação na linha dos rodados é visível desde a camada superficial de 0 a 10 cm até a profundidade de 20 a 40 cm. Portanto, estas informações mostram que para este sistema de colheita, a compactação se limita a linha de rodados das máquinas, sendo estas distanciadas de acordo com o alcance da máquina, reduzindo assim o percentual de área compactada no talhão, desde que as máquinas utilizarem sempre o mesmo ramal de corte e extração.

Com relação à profundidade atingida pelo tráfego das máquinas, o resultado entra em acordo com o estudo realizado por Cechin (2007), que ao determinar o impacto provocado na resistência do solo à penetração, observou que a compactação do solo ocorreu no sentido vertical, variando de 0 a 43 cm com uma passada da máquina de extração e de 8 a 50 cm com três passadas da máquina.

Portanto, pode-se dizer que isso ocorre em função do efeito de sobreposição de passadas dos rodados da máquina, onde houve um acúmulo de cargas no solo. De acordo com Salire et al., (1994) e Håkansson et al., (1997), a compactação pode ocorrer tanto nas camadas superficiais como no subsolo, quando a compactação é superficial, pode-se dizer que ocorre em função da pressão de inflação dos pneus, enquanto que a compactação subsuperficial ocorre em função da carga total por eixo.

Ao planejar o preparo de solo desta área de acordo com a resistência do solo à penetração, seria necessário realizá-lo com maior intensidade onde ocorreu o tráfego dos rodados das máquinas, e com menor intensidade na região entre ramais, devendo atingir a profundidade de 40 cm. Desta maneira, seriam corrigidos os efeitos da compactação do solo causados pela colheita de madeira de maneira mais eficiente, aumentando a produtividade da operação e reduzindo custos.



**Figura 13.** Mapas da distribuição espacial da Resistência do solo à penetração (MPa) em área operacional da colheita de madeira pelo sistema de toras curtas nas distâncias 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 150 a 200 m, e nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

**Tabela 10.** Percentil da área estudada dentro de cada classe de resistência do solo à penetração (Mpa), nas distâncias da trilha de tráfego da área colhida pelo sistema de toras curtas, de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150, 151 a 200 m, e nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

		0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3
<b>Distância</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>% da área estudada</b>											
0 a 50	0 a 10	0,16	32,63	49,90	14,39	2,43	0,41	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,57	44,76	36,18	15,25	3,14	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,25	3,65	62,27	30,98	2,25	0,57	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,02	15,35	80,90	3,65	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50 a 100	0 a 10	0,62	44,66	36,30	15,30	3,12	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,31	14,18	45,73	29,45	7,98	1,88	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,31	13,20	66,25	19,29	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,08	26,10	72,94	0,82	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100 a 150	0 a 10	0,06	38,88	48,96	10,12	1,41	0,55	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,00	5,20	49,02	34,65	10,08	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,00	3,80	63,35	29,92	2,69	0,22	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,00	9,45	81,67	7,76	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
150 a 200	0 a 10	1,63	36,43	46,86	13,65	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,12	6,53	38,96	40,67	13,29	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,12	7,75	57,57	33,27	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,06	6,76	88,43	3,96	0,47	0,24	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## 5.2. Sistema de Árvores Inteiras

### 5.2.2. Caracterização do solo da área estudada

O solo estudado foi classificado como Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa, por apresentar uma quantidade média de 633 kg kg<sup>-1</sup> de areia total, 71 kg kg<sup>-1</sup> e 296 kg kg<sup>-1</sup> de argila (Tabela 11).

**Tabela 11.** Granulometria média, carbono orgânico do solo e umidade gravimétrica nas profundidades avaliadas.

Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	C.O. (g kg <sup>-1</sup> )	Ug (kg kg <sup>-1</sup> )
Sistema de árvores inteiras (Faisqueira)							
0 a 10	386	245	631	71	298	9,72	0,28
10 a 20	391	233	624	71	305	7,39	0,25
20 a 40	401	230	631	73	296	8,94	0,27
40 a 60	403	245	648	68	284	8,94	0,26
<b>Média</b>	<b>395</b>	<b>238</b>	<b>633</b>	<b>71</b>	<b>296</b>	<b>8,75</b>	<b>0,27</b>

CO: Carbono Orgânico; Prof: Profundidade; Ug: Umidade gravimétrica.

### 5.2.2. Parâmetros físicos do solo

#### 5.2.2.1. Densidade do solo

A Tabela 12 apresenta os dados de densidade do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita de madeira, após tráfego do *Feller-buncher* (FB), após o tráfego do *Skidder* (SK) e após o tráfego do Processador (P).

A densidade do solo na condição antes do tráfego das máquinas na área colhida pelo sistema de árvores inteiras, aumentou de 1,50 Mg m<sup>-3</sup> na camada superficial (0 a 10 cm) e nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm a média da densidade era de 1,54 e 1,58 Mg cm<sup>-3</sup>. Este menor valor encontrado na camada superficial pode estar relacionado ao maior teor de carbono orgânico presente nesta camada.

O tráfego do *Feller-buncher* alterou a densidade do solo com uma única passada sobre a área, ocasionando um incremento médio de 6,7 % nas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm), porém, o maior incremento ocorreu na camada subsuperficial (40 a 60 cm) com 7,9 % em relação à testemunha (AT).

**Tabela 12.** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do *Feller buncher* (FB), após as passadas do *Skidder* (FB + SK), e após a passada do Processador (FB + SK + P) nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	<b>Ds (<math>\text{Mg m}^{-3}</math>)</b>							
<b>AT</b>	1,50 D c ( $\pm 0,02$ )	1,54 D b ( $\pm 0,02$ )	1,58 D a ( $\pm 0,04$ )	1,52 D c ( $\pm 0,023$ )	1,54	19,30**	0,056	3,70
<b>FB</b>	1,60 C b ( $\pm 0,08$ )	1,64 C a ( $\pm 0,06$ )	1,67 C a ( $\pm 0,07$ )	1,64 C ab ( $\pm 0,08$ )	1,64	3,45*	0,154	4,74
<b>FB + SK</b>	1,86 B a ( $\pm 0,18$ )	1,84 B a ( $\pm 0,13$ )	1,81 B ab ( $\pm 0,13$ )	1,75 B b ( $\pm 0,13$ )	1,82	2,44*	0,083	7,96
<b>FB + SK + P</b>	2,08 A a ( $\pm 0,01$ )	1,98 A b ( $\pm 0,03$ )	1,95 A c ( $\pm 0,02$ )	1,91 A d ( $\pm 0,02$ )	1,98	65,52**	0,030	0,80
<b>Valor F</b>	38,76**	41,26**	38,06**	20,76**				
<b>DMS</b>	0,25	0,19	0,19	0,20				
<b>CV (%)</b>	7,24	5,46	5,48	6,03				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, FB: Após a passada do *Feller-buncher*, FB + SK: Após as passadas do *Skidder*, FB + SK + P: Após a passada do Processador) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Ds: Densidade do solo; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Após o tráfego do *Skidder*, os maiores valores médios de densidade encontrados foram nas camadas superficiais de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com 1,86 e 1,84  $\text{Mg m}^{-3}$ , que correspondendo a um incremento médio de 24,0 e 19,5 %, respectivamente. Nas camadas subsuperficiais, os valores médios encontrados foram menores, sendo 1,81 e 1,75  $\text{Mg m}^{-3}$ , que correspondeu a um incremento médio de 14,6 e 15,1 %. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Sampietro (2010), que também constatou tal ocorrência, onde o autor relatou que os efeitos críticos do tráfego sobre o solo tendem a decrescer com a profundidade.

Segundo proposto por Reinert et al. (2006), para um solo com teor médio de argila de 296  $\text{g kg}^{-1}$ , a densidade crítica é de 1,86  $\text{Mg m}^{-3}$  e restritiva de 2,07  $\text{Mg m}^{-3}$ . Devido ao tráfego do processador que ocorre na margem do talhão foram detectados os maiores valores de densidade do solo, com destaque para a primeira camada do solo (0 a 10 cm), com valor médio de 2,08  $\text{Mg m}^{-3}$ , considerado restritivo ao desenvolvimento das plantas.

O local trafegado pelo processador apresentaram os maiores incrementos da densidade do solo em todas as camadas avaliadas, variando de 23,4 a 38,7 % em relação à testemunha, seguido do tratamento após o tráfego do *Skidder*, com um incremento de 24,0 e 19,5 %, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, respectivamente. Estas camadas ultrapassaram o valor da densidade limite de Geist et al., (1989), que propôs que

incrementos acima de 15 % em relação a condição inicial do solo, já pode ser considerado como crítico ao desenvolvimento radicular das plantas.

Estes incrementos nos valores da densidade do solo na condição antes do tráfego das máquinas para a condição após realizadas as operações de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras mostraram que as operações mecanizadas foram responsáveis pela compactação do solo, sendo a profundidade de 0 a 20 cm a mais afetada no talhão.

A intensidade tráfego das máquinas na operação de extração de madeira variou ao longo do talhão, e conseqüentemente a compactação causada ao solo. Para visualizar tal variabilidade, a Tabela 13 mostra os valores de densidade do solo encontrados após o tráfego do *Skidder* nas classes de distância de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m, e nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

**Tabela 13.** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras.

Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	Ds ( $\text{Mg m}^{-3}$ )							
<b>0 a 50</b>	1,96 A a ( $\pm 0,13$ )	1,96 A a ( $\pm 0,02$ )	1,94 A a ( $\pm 0,01$ )	1,88 A a ( $\pm 0,03$ )	1,94	1,78 <sup>ns</sup>	0,085	3,64
<b>51 a 100</b>	1,91 AB a ( $\pm 0,19$ )	1,88 AB a ( $\pm 0,13$ )	1,85 AB a ( $\pm 0,10$ )	1,76 AB a ( $\pm 0,16$ )	1,85	1,08 <sup>ns</sup>	0,185	8,32
<b>101 a 150</b>	1,74 B a ( $\pm 0,20$ )	1,74 C a ( $\pm 0,13$ )	1,77 BC a ( $\pm 0,11$ )	1,73 B a ( $\pm 0,12$ )	1,74	1,22 <sup>ns</sup>	0,110	6,55
<b>151 a 200</b>	1,82 AB a ( $\pm 0,13$ )	1,77 BC ab ( $\pm 0,10$ )	1,69 C bc ( $\pm 0,10$ )	1,64 B c ( $\pm 0,08$ )	1,73	3,99*	0,120	5,74
<b>Média</b>	1,86	1,84	1,81	1,75				
<b>Valor F</b>	1,85*	6,19**	7,95**	4,85*				
<b>DMS</b>	0,20	0,12	0,11	0,13				
<b>CV (%)</b>	9,11	5,47	5,15	6,25				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Ds: Densidade do solo; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Como pode ser observado, na classe de distância de 0 a 50 metros, onde houve a maior intensidade de tráfego com uma passada do *Feller-buncher* e 14 passadas do *Skidder* (FB + 14 SK), foram encontrados os maiores valores de densidade do solo, variando de  $1,96 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada superficial (0 a 10 cm) a  $1,88 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada subsuperficial (40 a 60 cm), sendo que todas as profundidades se encontram dentro do limite crítico proposto por Reinert et al., (2006) citado anteriormente. Na classe de distância de 51 a 100 m, com uma passada do *Feller-buncher* e 10 passadas do *Skidder*,

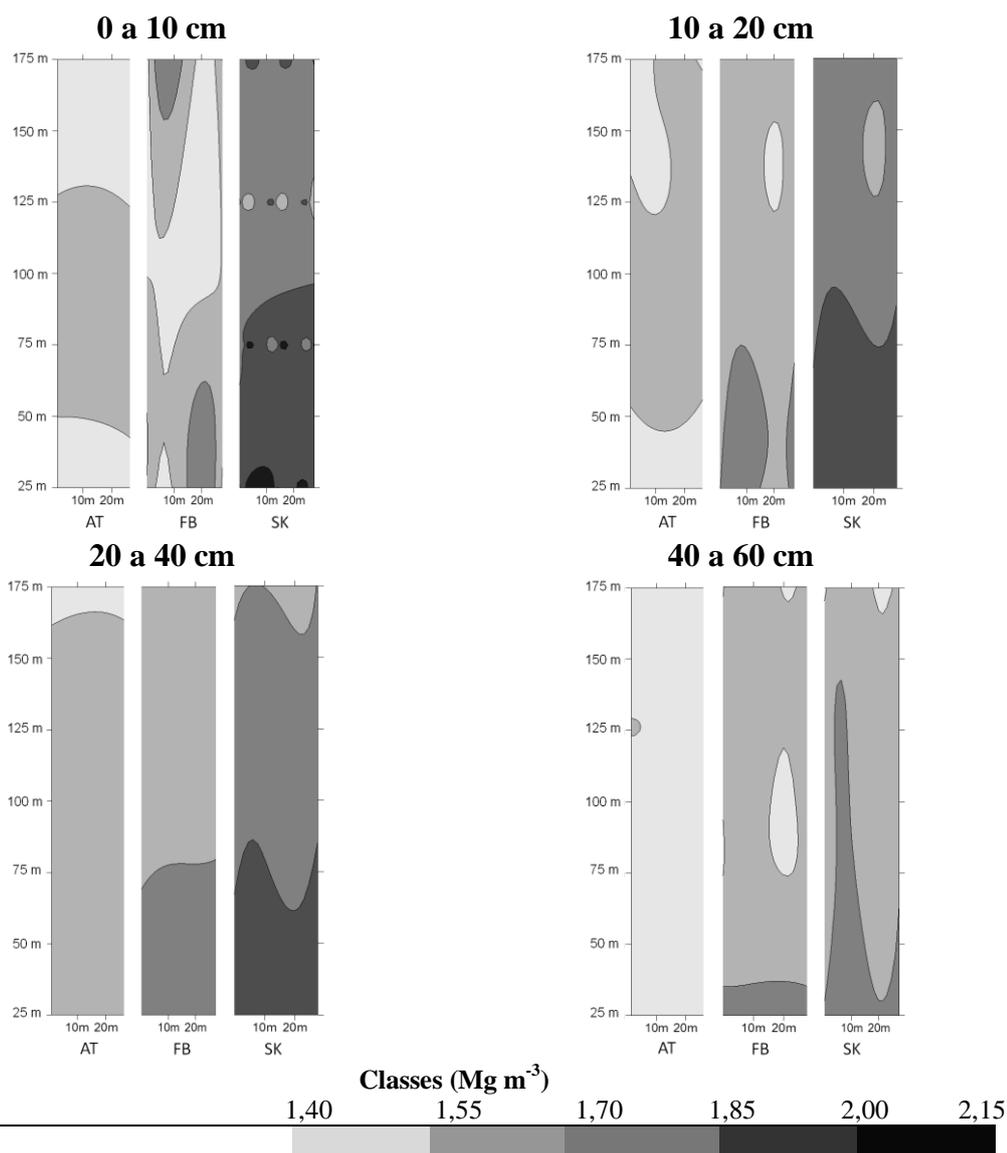
as duas primeiras camadas do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm) apresentaram valores altos de densidade do solo, com uma média de 1,91 e 1,88 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Nas classes de distância de 101 a 150 e 151 a 200 m, os valores de densidade do solo não corresponderam aos valores acima da densidade crítica.

É possível notar que em todas as camadas avaliadas, as classes de distâncias de 0 a 50 e 51 a 100 m não apresentaram diferença significativa, assim como as classes de 101 a 150 e 151 a 200 m. Esta semelhança de densidade do solo ao longo do talhão mostra que as primeiras passadas são aquelas responsáveis pela maior compactação do solo, não apresentando diferença significativa com o aumento da intensidade de tráfego. Portanto, este resultado entra em acordo com Seixas e Souza (1998), que observaram que em torno de 80 % da compactação total do solo ocorrida após 20 passadas de um trator acoplado a uma carreta carregada de madeira, resultou das cinco primeiras viagens.

Esta distribuição da variabilidade espacial da densidade do solo ao longo do talhão após o tráfego do *Skidder*, assim como na condição antes do tráfego das máquinas e após o tráfego do *Feller-buncher* podem ser visualizados nos mapas de densidade do solo na Figura 14.

No tratamento antes do tráfego das máquinas predominou-se a classe de densidade do solo de 1,55 a 1,69 Mg m<sup>-3</sup> nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, e na camada mais profunda do solo (40 a 60 cm) predominou a classe de 1,40 a 1,54 Mg m<sup>-3</sup>. Com o tráfego do *Feller-buncher*, a densidade do solo se alterou passando a apresentar áreas dentro da classe de 1,70 a 1,84 Mg m<sup>-3</sup> sendo a mais afetada a camada de 20 a 40 cm, com 34 % da área dentro desta classe.

Após o tráfego do *Skidder*, ocorrem as maiores alterações de compactação, sendo mais intensas na região próxima à margem do talhão. A área experimental apresentou predominância na classe de 1,70 a 1,84 Mg m<sup>-3</sup> nas três camadas iniciais, enquanto que na camada mais profunda apresentou 63 % da área na classe de 1,55 a 1,69 Mg m<sup>-3</sup>. Nota-se que a região próxima à margem do talhão apresentou os maiores valores de densidade do solo, correspondendo a 42, 39 e 32 % da área nas três camadas iniciais, com valores situados entre 1,85 a 1,99 Mg m<sup>-3</sup>, acarretado, portanto, pela maior intensidade de tráfego ocorrida nesta região.



Trat.	Profundidade (cm)	Classes ( $\text{Mg m}^{-3}$ )					
		1,40	1,55	1,70	1,85	2,00	2,15
AT	0 a 10	43	57	0	0	0	0
	10 a 20	32	68	0	0	0	0
	20 a 40	7	93	0	0	0	0
	40 a 60	99	1	0	0	0	0
FB	0 a 10	41	47	12	0	0	0
	10 a 20	4	78	18	0	0	0
	20 a 40	0	66	34	0	0	0
	40 a 60	8	84	8	0	0	0
FB + SK	0 a 10	0	2	55	42	1	0
	10 a 20	0	5	56	39	0	0
	20 a 40	0	5	63	32	0	0
	40 a 60	8	64	28	0	0	0

**Figura 14.** Mapas da distribuição espacial da Densidade do solo  $D_s$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do *Feller-buncher* (FB), após tráfego do *Skidder* (FB + SK), no sistema de árvores inteiras.

A variabilidade espacial da compactação do solo nas três condições de tráfego apresentada mostrou como ocorreram os incrementos da densidade do solo após cada operação da colheita de madeira. Entretanto, esta variabilidade observada já após o tráfego do *Skidder* mostra que deve ser aplicado um método corretivo para minimizar os efeitos do tráfego das máquinas por meio de preparo de solo, com uso de subsoladores.

Nos mapas confeccionados foi possível visualizar a possibilidade de realização do preparo do solo de forma diferenciada de acordo com a intensidade de tráfego observada. Nas classes de distância de 0 a 100 m ao longo da margem do talhão, o preparo de solo deverá ser mais profundo até a profundidade de 60 cm, enquanto que nos demais locais do talhão (acima de 100 m) deverá ocorrer até 40 cm, pois a densidade do solo não atingiu os valores críticos ao desenvolvimento das plantas nestes locais.

#### **5.2.1.2. Porosidade total**

Na Tabela 14 são apresentados os valores da Porosidade Total do solo (Pt) nos tratamentos antes do tráfego das máquinas, após o tráfego do *Feller-buncher*, após o tráfego do *Skidder*, e após o tráfego do Processador nas quatro camadas avaliadas. Nota-se que a média da Pt decresceu com as operações de colheita de madeira.

Na condição antes do tráfego das máquinas, a porosidade variou de 0,438 a 0,422 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, enquanto após o tráfego do *Feller-buncher*, a porosidade total apresentou um decréscimo percentual de 8,9 % na camada superficial do solo (0 a 10 cm) em relação ao momento antes do tráfego, enquanto que a profundidade de 20 a 40 cm, foi aquela que sofreu o maior decréscimo da Pt, com 14,8 %, com um valor médio de 0,373 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Tal resultado se deve ao fato de que a primeira passada da máquina foi responsável pela maior alteração sofrida no solo.

Após o tráfego do *Skidder*, nota-se que a porosidade total decresceu com relação aos valores encontrados na condição antes do tráfego das máquinas e após o tráfego do *Feller-buncher*, apresentando diferença significativa entre os tratamentos. A maior redução da porosidade total ocorreu na camada superficial de 0 a 10 cm, com uma Pt média de 0,303 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, que correspondeu a uma redução de 30,8 % em relação à condição antes do tráfego das máquinas. Os efeitos foram decrescentes em profundidade, sendo a menor redução na camada subsuperficial (40 a 60 cm), com uma Pt média de 0,343 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, que correspondeu a uma redução de 20,4 %.

**Tabela 14.** Valores médios de porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) antes do tráfego (AT), após passada do *Feller buncher* (FB), após as passadas do *Skidder* (FB + SK) e após a passada do Processador (FB + SK + P) nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	Pt ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )							
AT	0,438 A a ( $\pm 0,010$ )	0,422 A b ( $\pm 0,009$ )	0,438 A c ( $\pm 0,013$ )	0,431 A a ( $\pm 0,085$ )	0,432	19,29**	0,021	2,48
FB	0,399 B a ( $\pm 0,031$ )	0,382 B b ( $\pm 0,024$ )	0,373 B b ( $\pm 0,027$ )	0,386 B ab ( $\pm 0,033$ )	0,385	3,45*	0,058	7,57
FB + SK	0,303 C b ( $\pm 0,067$ )	0,314 C ab ( $\pm 0,045$ )	0,335 C ab ( $\pm 0,039$ )	0,351 C a ( $\pm 0,046$ )	0,320	8,43**	0,092	13,71
FB + SK + P	0,219 D c ( $\pm 0,002$ )	0,268 D b ( $\pm 0,010$ )	0,269 D b ( $\pm 0,001$ )	0,285 D a ( $\pm 0,001$ )	0,260	86,62**	0,009	2,02
Valor F	38,76**	42,47**	38,06**	20,76**				
DMS	0,092	0,065	0,070	0,076				
CV (%)	12,79	9,01	9,74	10,13				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, FB: Após a passada do *Feller-buncher*, FB + SK: Após as passadas do *Skidder*, FB + SK + P: Após a passada do Processador) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Pt: Porosidade total; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Após a passada do processador na região próxima à margem do talhão, onde também houve muitas manobras do *Skidder*, nota-se que a porosidade total foi muito comprometida, sendo que a camada superficial foi a mais afetada, apresentando uma redução de 50,0 % em relação à condição antes do tráfego, com uma porosidade total média de  $0,219 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Nas demais camadas no solo, as reduções da Pt foram decrescentes, sendo semelhante ao efeito verificado após o tráfego do *Skidder*. O menor efeito do tráfego foi encontrado na camada subsuperficial (40 a 60 cm), com uma média de  $0,285 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , que corresponde a uma redução 33,9 % em relação à testemunha (AT). Desta forma, salienta-se que a região de bordadura do talhão foi a que sofreu os maiores impactos ocasionados pela atividade de colheita de madeira.

Para verificar os efeitos ocasionados no solo ao longo do talhão pela atividade de extração da madeira, a Tabela 15, apresenta os valores de porosidade total nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão (0 a 50, 51 a 100, 101 a 150, 151 a 200 m) e nas quatro profundidades avaliadas.

É possível observar que na camada superficial do solo (0 a 10 cm), a porosidade total não apresentou diferença significativa na maioria das classes de distâncias, exceto na classe de 0 a 50 m, que diferiu da classe de 101 a 150 m. Nesta camada do solo, a porosidade total média diferiu de  $0,265$  a  $0,345 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , sendo considerados baixos

segundo Prevedello (1996). Já nas camadas inferiores é possível visualizar os efeitos das diferentes intensidades de tráfego em cada classe de distância. Na camada de 10 a 20 cm, a classe de distância de 0 a 50 m diferiu das demais, apresentando o menor valor de Pt ( $0,264 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Nas camadas subsuperficiais (20 a 40 e 40 a 60 cm), as classes de distâncias de 0 a 50 e 51 a 100 m se diferem das demais, com os menores valores de Pt.

**Tabela 15.** Valores médios de porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão e nas diferentes profundidades avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras.

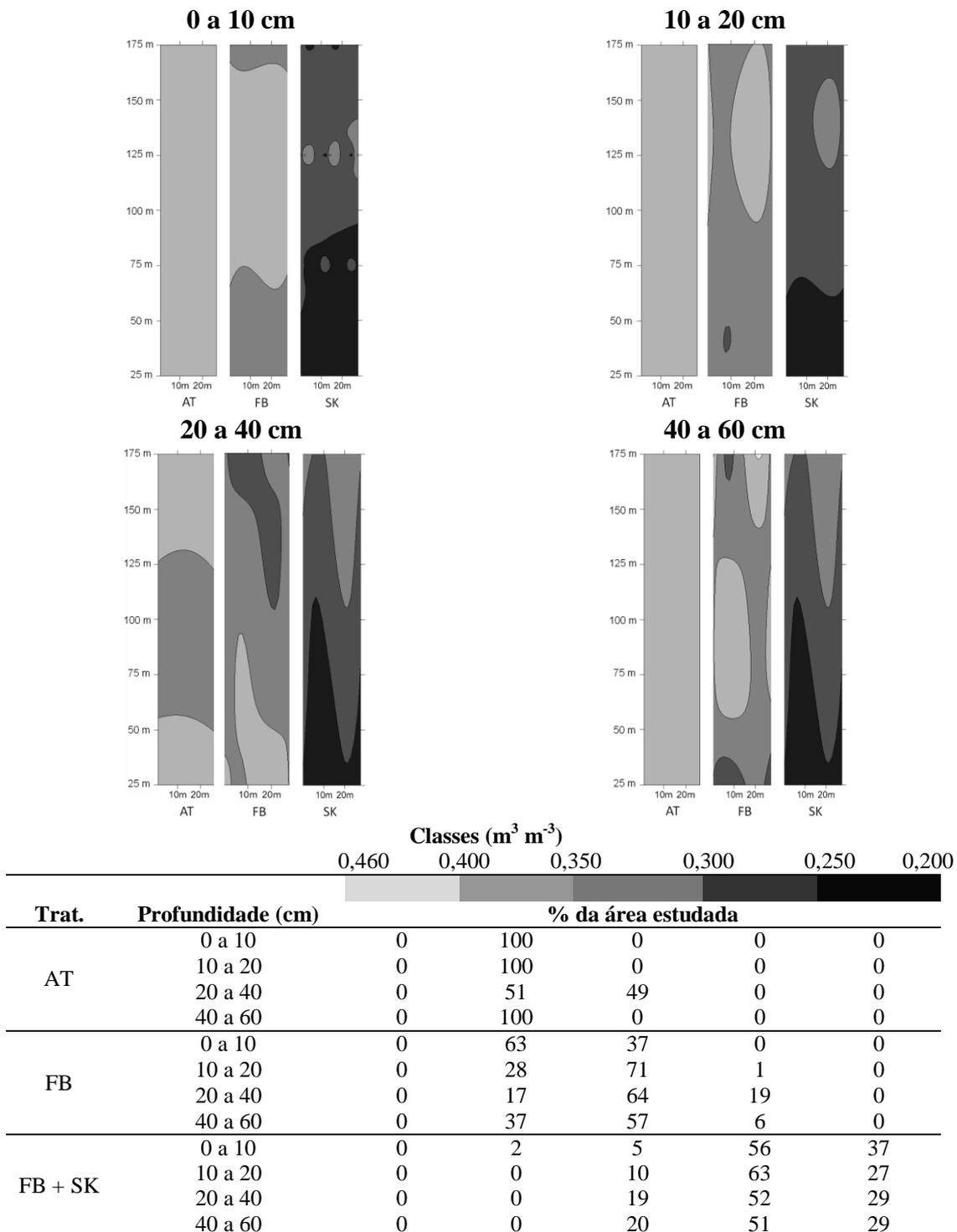
Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
	Pt ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )							
<b>0 a 50</b>	0,265 B a ( $\pm 0,051$ )	0,264 B a ( $\pm 0,008$ )	0,272 C a ( $\pm 0,002$ )	0,295 B a ( $\pm 0,001$ )	0,274	1,78 <sup>ns</sup>	0,032	9,65
<b>51 a 100</b>	0,284 AB a ( $\pm 0,072$ )	0,310 A a ( $\pm 0,036$ )	0,305 BC a ( $\pm 0,041$ )	0,341 AB a ( $\pm 0,065$ )	0,310	1,10 <sup>ns</sup>	0,055	7,69
<b>101 a 150</b>	0,345 A a ( $\pm 0,075$ )	0,347 A a ( $\pm 0,050$ )	0,335 AB a ( $\pm 0,041$ )	0,351 A a ( $\pm 0,045$ )	0,344	0,09 <sup>ns</sup>	0,066	5,80
<b>151 a 200</b>	0,316 AB c ( $\pm 0,052$ )	0,337 A bc ( $\pm 0,021$ )	0,366 A ab ( $\pm 0,039$ )	0,384 A a ( $\pm 0,029$ )	0,351	3,98*	0,45	10,61
<b>Média</b>	0,303	0,314	0,319	0,343				
<b>Valor F</b>	1,85*	7,50**	7,95**	4,84*				
<b>DMS</b>	0,076	0,040	0,042	0,049				
<b>CV (%)</b>	20,99	10,57	10,97	11,99				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; Pt: Porosidade total; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Uma maneira de visualizar a distribuição espacial da porosidade total do solo é por meio de técnicas geoestatísticas, seguida da confecção de mapas de isolinhas. Na Figura 15, são apresentados os mapas temáticos destes parâmetros nas quatro profundidades avaliadas e nas três condições de tráfego, antes do tráfego, após o tráfego do *Feller-buncher* e após o tráfego do *Skidder*.

Na condição antes do tráfego em todas as camadas do solo, a porosidade total apresentou predominância na área dentro da classe de  $0,400$  a  $0,351 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Com a ocorrência do tráfego do *Feller-buncher*, a primeira camada do solo sofreu pouca alteração, pois 63 % da área continuaram na classe de  $0,400$  a  $0,351 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto o restante se encontrou na classe  $0,350$  a  $0,301 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na camada de 10 a 20 cm, a classe inicial reduziu para 28 % da área, apresentando 71 % na classe  $0,350$  a  $0,301 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na camada de 20 a 40 cm, o solo apresentou predominância na classe  $0,350$  a  $0,301 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com uma zona de 19 % da área na região próxima à margem do talhão na classe  $0,300$  a

0,251 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. E na camada de 40 a 60 cm, a área apresentou 37 % na classe inicial, 57 % da área passou para a classe de 0,350 a 0,301 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.



**Figura 15.** Mapas da distribuição espacial da Porosidade total do solo Pt (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40; 40 a 60 cm, antes do tráfego das máquinas de colheita (AT), após tráfego do *Feller-buncher* (FB), após tráfego do *Skidder* (FB + SK), no sistema de árvores inteiras.

Com o tráfego do *Skidder* na camada superficial (0 a 10 cm), 56 % da área se encontraram na classe de 0,300 a 0,251 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e 37 % na classe menor que 0,250 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Na camada de 10 a 20 cm, 63 % da área se encontraram na classe 0,300 a 0,251 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e 27 % na classe menor que 0,250 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Na camada de 20 a 40 cm, predominou a classe 0,300 a 0,251 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, com 52 %, sendo que 29 % da área apresentou Pt menor que 0,250 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Por fim, na camada subsuperficial (40 a 60 cm) 51 % da área se encontra na classe 0,300 a 0,251 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e 29 % na classe menor que 0,250 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Por meio dos mapas temáticos da porosidade total do solo foi possível novamente visualizar a necessidade de realizar um preparo de solo mais intenso na região próxima à margem do talhão, devido à maior intensidade de tráfego ocorrida nesta região.

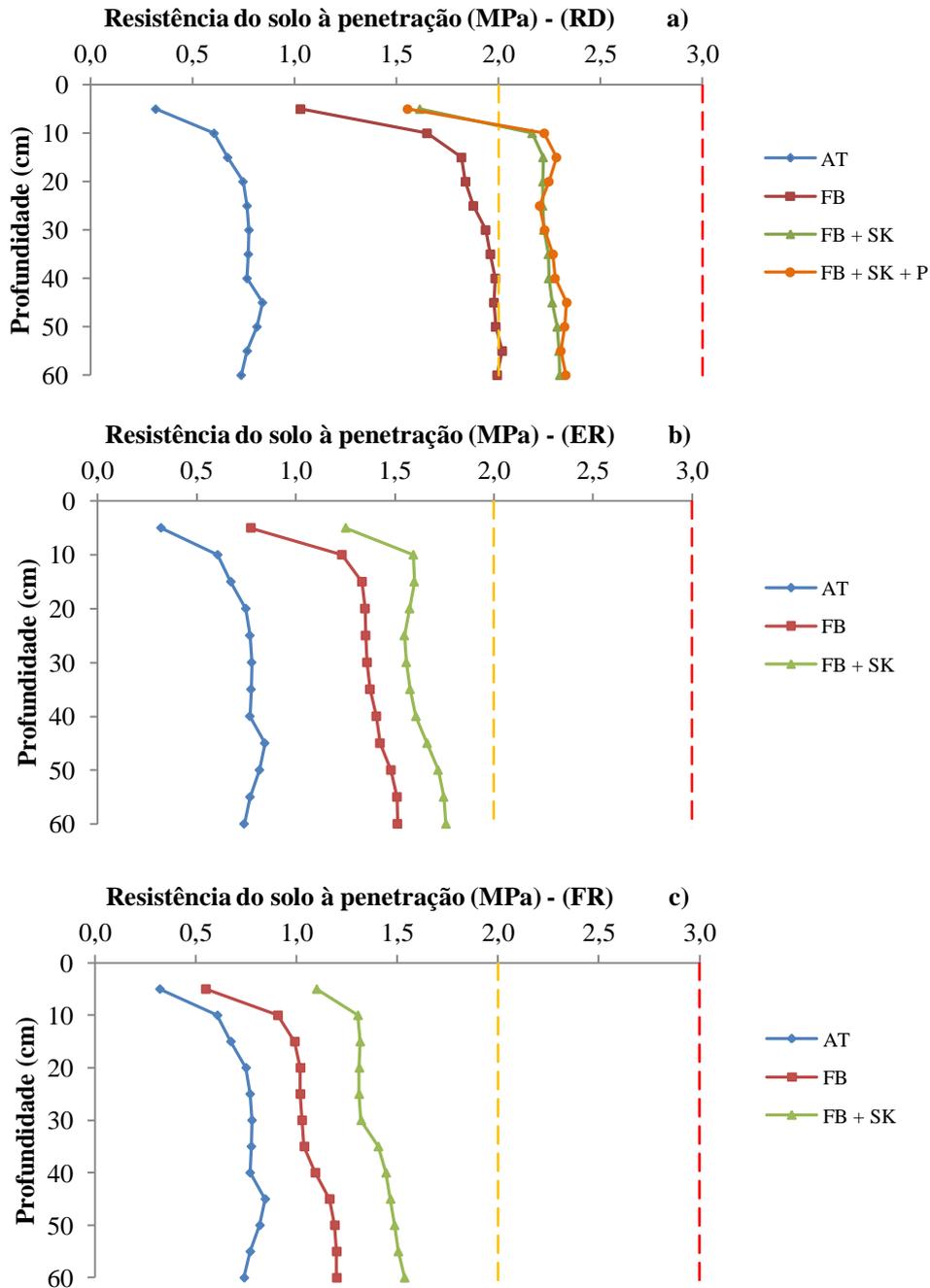
### 5.2.1.3. Resistência do solo à penetração

Na Figura 16 são apresentados os valores de resistência do solo à penetração antes do tráfego das máquinas (AT), após o tráfego do *Feller-buncher* (FB), do *Skidder* (SK) e do tráfego do Processador (P), obtidas nas posições de linha de rodados (RD), entre rodados (ER) e fora dos rodados (FR) até a profundidade de 60 cm.

É possível notar que, as operações de colheita de madeira acarretaram em um aumento nos valores de resistência do solo à penetração, sendo os maiores encontrados na posição linha dos rodados (Figura 16a). Nesta posição percebe-se que o tráfego do *Skidder* (SK) e do Processador (P) causaram um aumento significativo, com valores médios dentro do limite crítico ao desenvolvimento das plantas de 2 MPa proposto por Lapen et al., (2004). Na posição entre rodados e fora dos rodados, os incrementos também foram crescentes, porém com menor intensidade, não atingindo o valor crítico. Porém, salienta-se que todos os valores se apresentaram abaixo do limite restritivo para o desenvolvimento de espécies florestais (3 MPa) proposto por Zou et al., (2000).

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios da resistência do solo à penetração nas três condições de tráfego e nas posições mensuradas.

Observa-se que na camada superficial do solo (0 a 10 cm) na posição RD, a média da RP na condição antes do tráfego das máquinas (AT) era de 0,450 MPa, após o tráfego do *Feller-buncher* (FB) a RP média passou para 1,312 MPa, correspondendo a um incremento de 191,6 %.



**Figura 16.** Valores médios de RP nas diferentes condições de tráfego no sistema de árvores inteiras. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados (FR); Linha tracejada laranja = RP crítica; Linha tracejada vermelha = RP restritiva.

Após o tráfego do *Skidder* (SK), a camada superficial apresentou um aumento de 314,4 % na RP, com uma média de 1,865 MPa. Na camada de 10 a 20 cm, a média da RP após o tráfego do *Skidder* foi de 2,219 MPa, correspondendo a um incremento de 212,1 % em relação a condição inicial. Na camada de 20 a 40 cm, a média da RP foi de 2,233 MPa, enquanto que na camada de 40 a 60 cm, a média foi de 2,287 MPa. Isso

mostra que nas camadas subsuperficiais são encontrados valores preocupantes de RP, pois as médias ultrapassaram o valor crítico de 2 MPa.

**Tabela 16.** Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) antes do tráfego (AT), após passada do *Feller buncher* (FB), após as passadas do *Skidder* (SK) e após a passada do Processador (P), nas diferentes profundidades avaliadas.

Trat.	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
<b>RP (MPa)</b>								
<b>Na Linha dos rodados</b>								
AT	0,450 C c (±0,171)	0,711 D b (±0,050)	0,772 C ab (±0,009)	0,792 D a (±0,048)	0,681	50,26**	0,159	11,19
FB	1,312 B c (±0,464)	1,829 C b (±0,015)	1,940 B ab (±0,049)	1,994 C a (±0,017)	1,769	32,11**	0,394	10,78
FB + SK	1,865 A b (±0,460)	2,219 B a (±0,006)	2,233 A a (±0,016)	2,287 B a (±0,017)	2,151	12,48**	0,386	8,84
FB + SK + P	1,859 A b (±0,538)	2,656 A a (±0,024)	2,244 A a (±0,041)	2,324 A a (±0,015)	2,270	10,74**	0,455	10,30
<b>Valor F</b>	26,21**	6391,42**	8919,35**	13325**				
<b>DMS</b>	0,872	0,058	0,021	0,018				
<b>CV (%)</b>	31,48	1,63	1,84	1,51				
<b>Entre rodados</b>								
AT	0,450 C c (±0,171)	0,711 B b (±0,050)	0,772 C ab (±0,009)	0,792 C a (±0,048)	0,681	50,26**	0,159	11,19
FB	0,982 B c (±0,302)	1,342 A b (±0,016)	1,373 B b (±0,023)	1,482 B a (±0,038)	1,295	36,49**	0,259	9,69
FB + SK	1,408 A c (±0,188)	1,586 A b (±0,014)	1,572 A b (±0,024)	1,722 A a (±0,041)	1,572	14,12**	0,261	8,17
<b>Valor F</b>	35,69**	42,80**	8522,68**	2585,97**				
<b>DMS</b>	0,543	0,025	0,040	0,085				
<b>CV (%)</b>	28,12	2,26	1,63	3,19				
<b>Fora dos rodados</b>								
AT	0,450 C c (±0,171)	0,711 C b (±0,050)	0,772 C ab (±0,009)	0,792 C a (±0,048)	0,681	50,26**	0,159	11,19
FB	0,711 B c (±0,225)	1,004 B b (±0,017)	1,044 B b (±0,033)	1,187 B a (±0,022)	0,987	57,02**	0,195	9,51
FB + SK	1,192 A c (±0,197)	1,311 A b (±0,003)	1,369 A b (±0,066)	1,497 A a (±0,027)	1,342	27,65**	0,185	6,73
<b>Valor F</b>	39,23**	38,02**	980,11**	2133,48**				
<b>DMS</b>	0,173	0,021	0,086	0,068				
<b>CV (%)</b>	25,32	12,60	4,02	2,95				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha=0,05$ ). Letras maiúsculas comparam os tratamentos (AT: Antes do tráfego, FB: Após a passada do *Feller-buncher*, FB + SK: Após as passadas do *Skidder*, FB + SK + P: Após a passada do Processador) na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para o mesmo tratamento. \*significativo a 5%; \*\*significativo a 1%; ns não significativo; RP: Resistência do solo à penetração; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Na região próxima à margem do talhão, onde ocorreu o tráfego do Processador, a RP na camada superficial foi de 1,859 MPa, correspondendo a um incremento médio de 313,1 %. Na camada de 10 a 20 cm a média foi de 2,656 MPa, apresentando um incremento de 273,6 %, sendo a camada que apresentou o maior valor médio de RP.

Nas camadas de 20 a 40 e 40 a 60 cm as médias encontradas foram 2,244 e 2,324 MPa, respectivamente. Estes valores mostram que a compactação do solo foi crescente em profundidade após as operações de colheita de madeira.

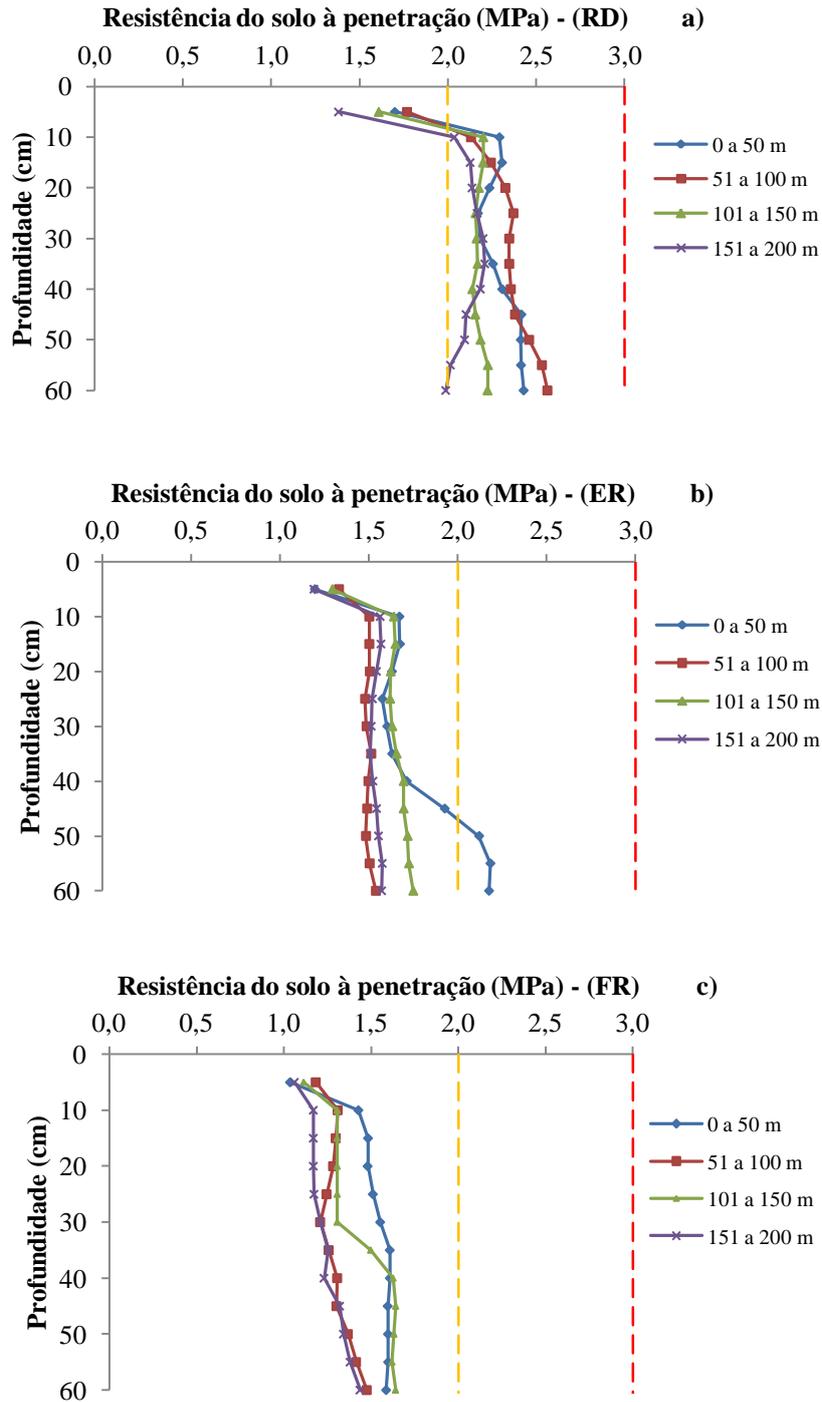
Na posição entre rodados (ER), a resistência do solo à penetração, assim como na linha dos rodados, foi crescente após as operações de colheita de madeira, porém os efeitos foram menos intensos. Após a passada do *Feller-buncher* a média da RP apresentou um aumento em profundidade, sendo o maior incremento encontrado na camada superficial (0 a 10 cm), com 118,2 % em relação à condição inicial do solo, enquanto nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm, o incremento foi em torno de 88,7 e 77,8 %, respectivamente. O maior valor encontrado foi na camada mais profunda (40 a 60 cm), com uma média de 1,482 MPa, correspondendo a um incremento de 87,1 %.

Após o tráfego do *Skidder*, a RP sofreu um incremento de 212,9 % na camada superficial, sendo que a RP aumentou em profundidade, com o maior valor encontrado na camada subsuperficial (40 a 60 cm), com uma média de 1,722 MPa.

Na posição fora dos rodados (FR) foram encontrados os menores valores de RP se comparado com as demais posições. Após o tráfego do *Feller-buncher*, o incremento da RP foi decrescente em profundidade, assim como após as passadas do *Skidder*.

Para avaliar a variabilidade da resistência do solo à penetração (RP) ao longo do talhão após a operação de extração de madeira, é apresentado na Figura 17 o comportamento dos valores observados até a profundidade de 60 cm nas classes de distâncias de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m e nas diferentes posições mensuradas, na linha dos rodados (RD), entre os rodados (ER) e fora dos rodados (FR).

É possível observar que na posição da linha dos rodados (Figura 17 a), todas as classes de distâncias apresentaram valores de RP acima do limite de 2 MPa, considerado crítico ao desenvolvimento das plantas. Isto mostra que são necessárias medidas mitigadoras para que a compactação do solo não atinja o limite restritivo de 3 MPa, para o desenvolvimento de espécies florestais, conforme proposto por Zou et al., (2000).



**Figura 17.** Valores médios de resistência à penetração para as posições e classes de distâncias, após a atividade de extração de madeira, no sistema de árvores inteiras. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados (FR); Linha tracejada laranja = RP crítica; Linha tracejada vermelha = RP restritiva.

Na posição entre rodados (Figura 17 b) e fora dos rodados (Figura 17 c) todas as classes de distância apresentaram baixos valores de RP. Isto mostra que a compactação do solo é maior abaixo da zona dos rodados, acarretando em um movimento lateral das partículas do solo, provocando incrementos da RP na posição entre rodados, e sendo menos pronunciados os seus efeitos na posição fora dos rodados.

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios da resistência do solo à penetração nas diferentes classes de distância e posições avaliadas, nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

Na posição da linha dos rodados, a camada de 0 a 10 cm, as classes de distâncias avaliadas não apresentaram diferença significativa nos valores médios de RP, apresentando uma média que variou de 1,969 a 1,679 MPa. Nesta camada do solo, as médias não atingiram o valor de 2 MPa, considerada como RP crítica. Na camada inferior (10 a 20 cm) os valores obtidos nas distâncias de 0 a 50 e 51 a 100 m apresentaram diferença significativa em relação às distâncias 101 a 150 e 151 a 200 m, sendo que as distâncias de 0 a 100 m apresentaram os maiores valores de RP. Na camada de 20 a 40 cm, todas as classes de distâncias apresentaram diferença significativa, sendo os maiores valores obtidos nas distâncias de 0 a 50 e 51 a 100 m. A camada mais profunda do solo se comportou de forma semelhante a anterior, onde é possível observar que em todas as classes de distância a RP foi crescente em profundidade.

Na posição entre rodados, a camada de 0 a 10 cm não apresentou diferença significativa entre as classes de distâncias ao longo do talhão, apresentando médias que variaram de 1,412 a 1,359 MPa. Já nas camadas inferiores, é possível observar que os maiores valores de RP se encontram na classe de distância de 0 a 50 m, onde ocorreu a maior intensidade de tráfego das máquinas, enquanto nas demais classes a RP foi decrescente.

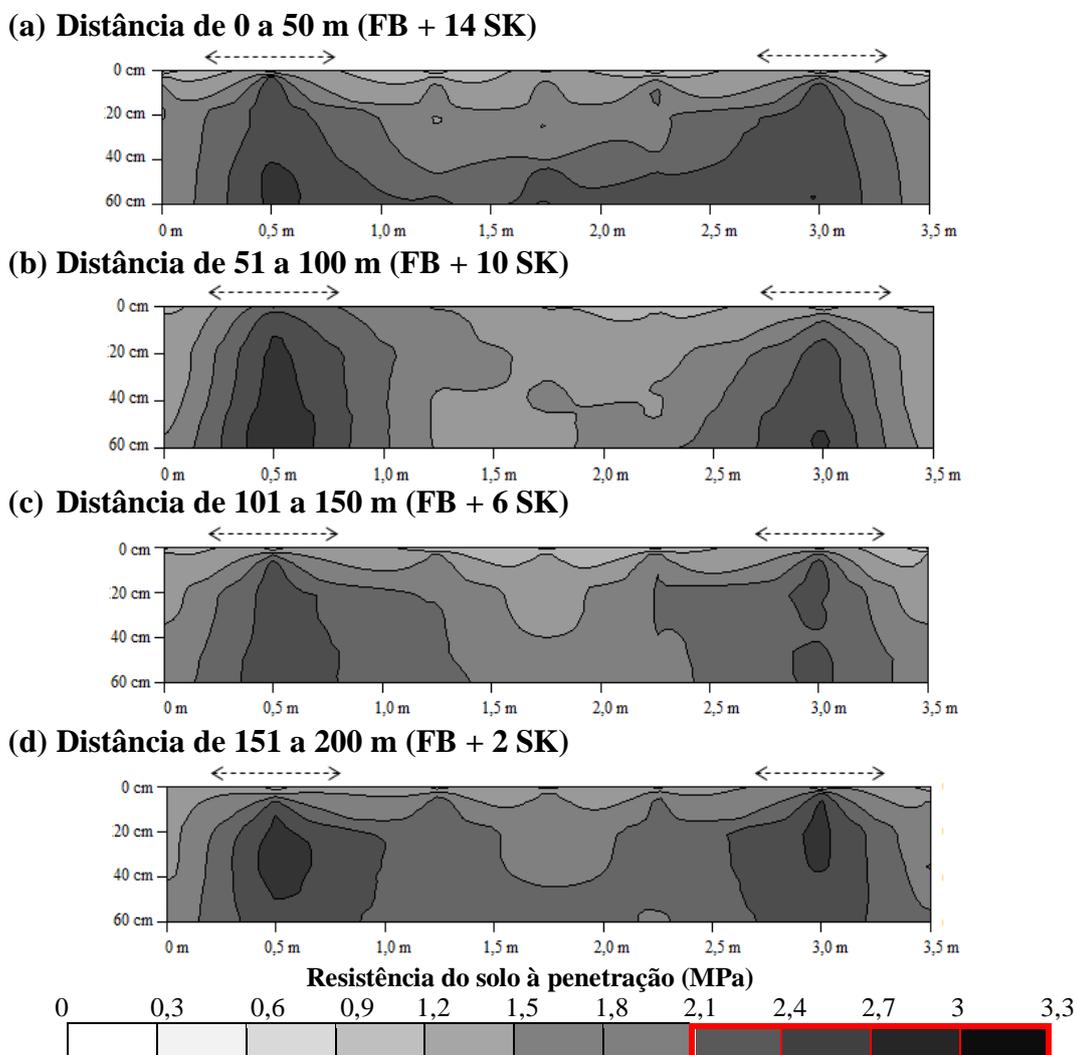
Os mesmos efeitos foram encontrados na posição fora dos rodados. Na camada de 0 a 10 cm, não houve diferença significativa entre as classes de distâncias. Nas demais camadas do solo, a RP decresceu ao longo do talhão, porém, esta posição apresentou os menores valores médios da RP se comparados com as demais posições.

**Tabela 17.** Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes classes de distâncias ao longo do talhão, nas diferentes profundidades e posições avaliadas, após a operação de colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras.

Classes de distância (m)	Profundidades (cm)				Média	Valor F	DMS	CV (%)
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60				
<b>RP (MPa)</b>								
<b>Linha dos rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	1,969 A c (±0,551)	2,271 A ab (±0,044)	2,229 B b (±0,0,60)	2,418 B a (±0,010)	2,222	6,29*	0,422	9,91
<b>51 a 100</b>	1,934 A c (±0,301)	2,285 A b (±0,053)	2,356 A b (±0,012)	2,484 A a (±0,075)	2,265	40,42**	0,270	5,85
<b>101 a 150</b>	1,878 A b (±0,501)	2,187 B a (±0,014)	2,157 D a (±0,013)	2,198 C a (±0,018)	2,105	6,29**	0,422	9,91
<b>151 a 200</b>	1,679 A c (±0,505)	2,132 C ab (±0,031)	2,189 C a (±0,036)	2,050 D b (±0,047)	2,012	14,16**	0,431	10,54
<b>Valor F</b>	0,821 <sup>ns</sup>	41,67**	116,52**	323,66**				
<b>DMS</b>	0,408	0,032	0,0227	0,031				
<b>CV (%)</b>	25,43	1,6	1,62	2,17				
<b>Entre rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	1,412 A c (±0,366)	1,652 A b (±0,028)	1,630 A b (±0,057)	2,101 A a (±0,116)	1,699	46,93**	0,342	5,69
<b>51 a 100</b>	1,408 A b (±0,148)	1,503 C a (±0,006)	1,493 C a (±0,016)	1,504 D a (±0,026)	1,477	6,08**	0,129	4,35
<b>101 a 150</b>	1,451 A b (±0,367)	1,636 A a (±0,016)	1,650 A a (±0,031)	1,722 B a (±0,025)	1,615	7,26**	0,311	9,51
<b>151 a 200</b>	1,359 A b (±0,345)	1,554 B a (±0,015)	1,515 B a (±0,008)	1,560 C a (±0,016)	1,497	5,077	0,290	9,61
<b>Valor F</b>	0,152 <sup>ns</sup>	152,55**	109,97**	384,32**				
<b>DMS</b>	0,276	0,016	0,021	0,038				
<b>CV (%)</b>	22,72	1,13	2,15	3,57				
<b>Fora dos rodados</b>								
<b>0 a 50</b>	1,215 A b (±0,349)	1,483 A a (±0,005)	1,571 A a (±0,044)	1,595 B a (±0,008)	1,466	17,83**	0,297	9,90
<b>51 a 100</b>	1,241 A b (±0,120)	1,291 C b (±0,010)	1,255 C b (±0,040)	1,390 C a (±0,066)	1,294	17,92**	0,134	5,16
<b>101 a 150</b>	1,202 A c (±0,238)	1,307 B c (±0,002)	1,435 B b (±0,161)	1,634 A a (±0,018)	1,395	27,79**	0,273	7,89
<b>151 a 200</b>	1,111 A d (±0,094)	1,170 D c (±0,002)	1,217 C b (±0,047)	1,370 C a (±0,047)	1,217	64,29**	0,110	4,43
<b>Valor F</b>	17,83**	17,92**	27,79**	64,29**				
<b>DMS</b>	0,193	0,005	0,056	0,026				
<b>CV (%)</b>	18,82	0,41	6,5	2,79				

\*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste DMS ( $\alpha = 0,05$ ). Letras maiúsculas comparam as classes de distância na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma classe de distância. \*significativo a 5 %; \*\*significativo a 1 %; ns não significativo; RP: Resistência do solo à penetração; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Para melhor visualizar a variabilidade espacial da RP nas diferentes posições avaliadas, a Figura 18, apresenta o perfil penetrométrico transversal de cada classe de distância avaliada, após as operações de corte e extração da madeira.



**Figura 18.** Efeito dos tratamentos ao longo do perfil em isolinhas de resistência do solo à penetração (MPa) no sistema de árvores inteiras; (a) Distância de 0 a 50 m, (b) Distância de 51 a 100 m, (c) Distância de 101 a 150 m, (d) Distância de 151 a 200 m. A legenda abaixo indica os valores de resistência à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados.

Na distância de 0 a 50 m, onde ocorreu uma passada do *Feller-buncher* e 14 passadas do *Skidder* (FB + 14 SK), é possível observar que ocorreram maiores modificações neste parâmetro físico, representado pela coloração mais escura, que conforme a escala de RP, correspondem aos valores de RP crítica acima de 2 MPa.

Os maiores efeitos causados pelo tráfego das máquinas é visível logo abaixo da zona de rodados, distribuídos lateralmente em menor intensidade. Estes efeitos são

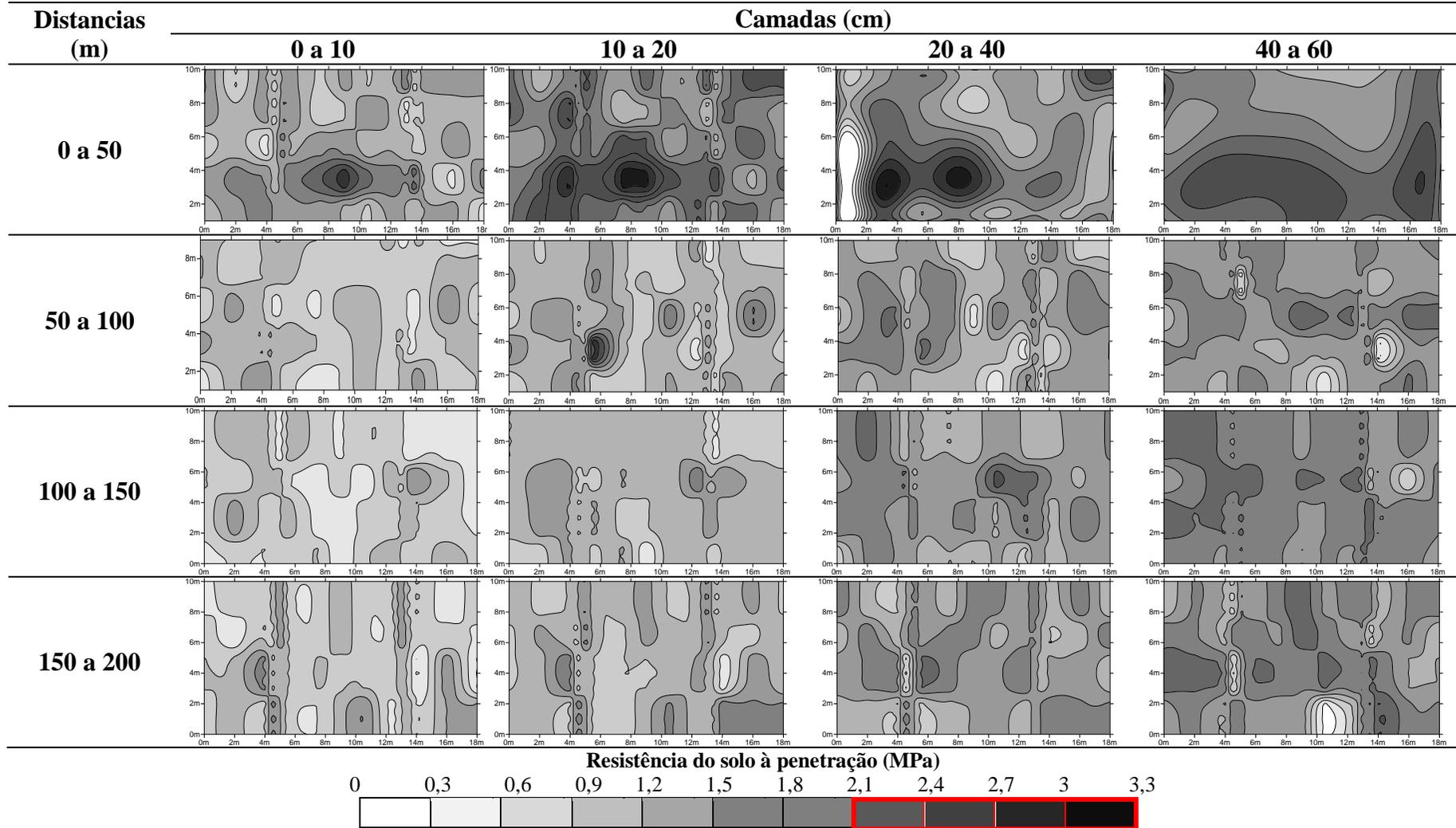
visíveis nas demais classes de distância ao longo do talhão, porém os efeitos causados foram menores.

A compactação logo abaixo da zona dos rodados nas camadas superficiais pode ter sido causada, segundo Hakanson et al., (1997), pela característica dos rodados, como a pressão de inflagem, enquanto que os efeitos mais pronunciados nas camadas mais profundas podem ter sido causados pela carga total por eixo devido as características das máquinas, que para este sistema de colheita são necessárias máquinas de grande porte para a execução do arraste das árvores até a margem do talhão.

Com a finalidade de auxiliar no planejamento de preparo de solo, a Figura 19, apresenta o mapeamento da resistência do solo à penetração nas classes de distância de 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m, nas quatro camadas de profundidade avaliadas. Na Tabela 19 é apresentado o percentual da área em cada classe de RP.

Neste sistema de colheita de madeira é pouco visível o local dos ramais trafegados pelas máquinas ao longo do talhão, porém foi notável que a compactação foi maior em profundidade. Nas camadas iniciais predominaram-se as classes de 1,20 a 1,49 MPa, enquanto que nas camadas mais profundas predomina a classe de 1,50 a 1,79 MPa.

O sistema de colheita de madeira por árvores inteiras possui a característica de não concentrar o tráfego apenas nos ramais formados pelo *Feller-buncher*. Segundo Seixas et al., (2003), a operação de extração realizada por um *Skidder*, altera 30 % da área plantada, sendo que 85 % da área total apresenta algum tipo de distúrbio do solo causado também pelo arraste do feixe de árvores. Portanto, os resultados obtidos mostram a viabilidade do mapeamento da compactação do solo como uma ferramenta adequada para determinar as camadas compactadas, de forma prática e rápida, permitindo visualizar a extensão e a variabilidade espacial dos parâmetros físicos do solo, e podendo subsidiar o planejamento das operações de preparo do solo.



**Figura 19.** Mapas da distribuição espacial da Resistência do solo à penetração (MPa) em área operacional da colheita de madeira pelo sistema de árvores inteiras nas distâncias 0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m, e nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40; 40 a 60 cm.

**Tabela 18.** Percentil da área estudada dentro de cada classe de resistência do solo à penetração (MPa), nas distâncias da trilha de tráfego da área colhida pelo sistema de árvores inteiras, de 0 a 50, 50 a 100, 100 a 150, 150 a 200 m, e nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

		0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3
<b>Distância</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>% da área estudada</b>											
0 a 50	0 a 10	0,00	0,00	1,16	11,92	36,94	34,16	11,31	2,78	1,25	0,48	0,00	
	10 a 20	0,00	0,00	0,12	4,22	20,63	30,53	24,80	11,76	4,53	2,27	1,14	
	20 a 40	0,16	12,88	50,27	25,34	10,65	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	40 a 60	1,73	1,49	1,27	3,37	18,55	25,88	22,45	11,51	7,33	4,16	2,26	
50 a 100	0 a 10	0,00	0,02	7,59	45,90	41,24	5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,00	0,84	23,80	50,67	19,92	3,47	0,61	0,43	0,26	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,00	1,44	9,37	25,41	40,16	22,35	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,06	1,39	2,18	8,27	53,06	30,00	5,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100 a 150	0 a 10	0,00	0,00	24,34	48,80	24,54	2,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,00	1,38	17,77	66,79	13,48	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,00	0,00	0,67	21,02	45,05	27,63	5,27	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,00	0,00	0,68	1,66	19,54	59,79	18,32	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
150 a 200	0 a 10	0,00	0,15	12,88	50,27	25,34	10,66	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10 a 20	0,00	0,00	0,70	21,95	51,20	18,77	7,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20 a 40	0,00	0,00	0,05	4,02	24,86	41,57	28,46	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	40 a 60	0,00	0,82	1,41	2,14	9,61	32,04	40,16	13,68	0,14	0,00	0,00	0,00

## 6. CONCLUSÕES

- Houve alterações significativas nos parâmetros físicos do solo após as operações de colheita de madeira em relação à condição inicial em ambos os sistemas estudados;
- Em ambos os sistemas de colheita de madeira, o aumento do tráfego das máquinas ocasionou incremento na densidade e redução da porosidade ao longo das trilhas de extração, porém com valores abaixo dos limites crítico e restritivo;
- No sistema de toras curtas, as camadas superficiais do solo foram compactadas com as primeiras passadas das máquinas e as subcamadas devido ao aumento na intensidade de tráfego, porém ocorreu somente próximo à margem do talhão;
- O maior incremento na resistência solo à penetração no sistema de toras curtas ocorreu na linha de rodados das máquinas na distância de 0 a 50 m e profundidade de 10 a 20 cm, porém não apresentando valores acima RP crítica;
- O aumento do tráfego das máquinas no sistema de árvores inteiras ocasionou aumento na densidade e redução da porosidade total ao longo da trilha de extração, sendo que na região próxima à margem do talhão, os valores estavam acima dos limites restritivos.
- No sistema de árvores inteiras, a resistência do solo à penetração foi mais crítica na linha dos rodados das máquinas e profundidade de 10 a 60 cm quando comparado às demais posições avaliadas, demonstrando a maior compactação nesta condição;
- A geoestatística se mostrou uma importante ferramenta na obtenção de estimativas de compactação do solo por meio de mapas temáticos, permitindo auxiliar o planejamento das operações de preparo do solo diferenciado ao longo do talhão;
- O preparo do solo nas áreas de colheita no sistema de toras curtas deverá ocorrer em maiores profundidades (60 cm) até a distância de 100 m próxima à margem do talhão, e a partir de 100 até 200 m, deve-se realizar o preparo de solo até 40 cm de profundidade.
- No sistema de árvores inteiras o preparo de solo deverá ocorrer em toda a área com a mesma intensidade, até 60 cm de profundidade, visto que a Resistência do Solo à Penetração, mostrou que este sistema acarretou maiores modificações em profundidade.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- A realização dos estudos de compactação do solo, de modo a gerar mapas de sensibilidade para os diferentes tipos de solo da empresa, possibilitando identificar as áreas mais sensíveis à compactação, subsidiando assim, o planejamento das operações de colheita de madeira com vistas à sustentabilidade florestal;
- Mapeamento dos parâmetros físicos dos solos contemplando os diferentes tipos de solos e locais do talhão, de modo a subsidiar a realização das operações de preparo de solo de forma diferenciada, dentro do conceito da silvicultura de precisão.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília: 2012. 150 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12>

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: 2013. 148 p. Disponível em: <[http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13\\_BR.pdf](http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf)>. Acesso em: 26 Jul. 2013.

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS. v.. 33, n.2, p.275-282, mar-abr, 2003.

AMPOORTER, A.; GORIS, R.; CORNELIS, W.M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **For Ecol Manage**, 241:162-174, 2007.

ASCE. Review of geostatistics in geohydrology. I: Basics concepts. **Journal of Hydraulic Engineering**, 116: 612-632, 1990.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manolo, 1987. 307p.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BORGES, E. N. **Resposta da soja e do eucalipto à camadas compactadas de solo**. 1986, 54f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1986.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; COSTA, L.M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. **R Bras Ci Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.125-130, 1997.

BRADY, N. C. & WEIL, R. R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. New York, Prentice Hall, 2. ed., 2003.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo/Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BYGDÉN, G.; WASTERLUND, I.; ELIASSON, L. Rutting and soil disturbance minimized by planning and using bogie tracks. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Universidade Federal de Viçosa/Sociedade de Investigação Florestal, 2003. p.1-9.

CAMARGO, C. M. dos S. **Compactação do solo causada pela colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema fuste (Tree length)**. 1999. 126f. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

CAMARGO, E. C.G.; FUKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de Superfície. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M., Eds. Análise espacial de dados geográficos. Brasília, Embrapa, 2004. p.49-71.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. 44p.

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

CANARACHE, A. PENETR – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Till Res**, Amsterdam, 16:51-7, 1990.

CARVALHO, J. R. P.; DECHENS, S. C. F.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística. **R Bras Ci Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.1-9, 2004.

CECHIN, N. F. **Compactação de dois argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda*** L. 2007. 136 f Universidade Federal de Santa Maria (Doutorado em Engenharia Florestal). Santa Maria, RS, 2007.

CORNS, I. G. W. Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. **Canadian Journal of Foret Research**, v.18, n.1, p.75-84, jan 1988. Canadá.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D. Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela distribuição dos poros. **R Bras Eng. Agríc Ambiental**, v.14, p.1160-1169, 2010.

CURI, N.; LARACH, J. O. I; KAMPF, N.; MONIZ, N.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.

DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **R Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.371-380, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E. & PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **R Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.343-349, 2003.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Taiga Tutorial**. Worcester-MA, Graduate School of Geografy,

Clark. University. 333p. 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997.

ETANA, A.; COMIA, R.A. & HÅKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil Till Res**, 44:13

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. p.375-396.

FERNANDES, H. C.; ORLANDO, R. C.; LANÇAS, K. P. Compactação do solo em relação à exploração florestal: influência do *Forwarder* e do *Harvester*. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.5, n.4, p.276- 280, 1997.

FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. de. **Compactação de um latossolo vermelho causada pelo tráfego do “forwarder”**. R. *Árvore*, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.279-284, 2003.

FAURE, A. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. **Soil Till Res**, v.1,n.2, p.97-105,1981.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V.M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Ci Agrárias**, v.31, n.4, p.913-932, 2010.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R Bras Ci Solo**, v.24, n.3, p.487-493, 2000.

FREITAS, L. C. **Avaliação quantitativa de impactos ambientais da colheita florestal em plantios equiâneos de eucalipto**. 2004. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

GEIST, J. M.; HAZARD, J. W.; SEIDEL, K. W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p. 946-50, 1989.

GENT, J. A., Jr., BALLARD R., HASSAN A.E., CASSEL D.K. Impact of site preparation on physical properties of Piedmont forest soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, p. 173-177, 1984.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer versão 9.9**. Tutorial. User's Guide. Golden Software, New York, 2010.

GOSS, M. J.; EHLERS, W.; BOONE, F. R.; HOWSE, K. R. Effects of soil management practice on soil physical conditions affective root growth. **J Agric Res**, v.30, p.131-140, 1984.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian**

**Journal of Soil Research**, v.18, p. 163-189, 1980.

GS+. **GS+ Geostatistical for environmental science**. Versão 5.0, Michigan: Gamma Design Software, 2000.

HADAS, A. Soil compaction caused by high axle loads: review of concepts and experimental data. **Soil Till Res**, Amsterdam, v.29, p. 253-276, 1994.

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

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUTWERKERK, C. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69 (Developments in Agricultural Engineering 11).

IAPAR . Instituto Agrônomo do Paraná. **Cartas Climáticas do Paraná**. Versão 1.0. 2000. (formato digital) 1 CD.

JAKOBSEN, B. F.; GREACEN, E. L. Compaction of sandy forest soils by Forwarder operations. **Soil Till Res**, v.5, n. 1, p. 55-70, 1985.

JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.445-452, 2000.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

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

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v.52, p.119-139, 1951.

LANÇAS, K. P.; UPADHYAYA, S. K. Pneus radiais para tratores: guia para seleção correta da pressão de inflação. **Energia na Agricultura Boletim Técnico**, n.1, p.1-33, 1997.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

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

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **R Bras Ci Solo**, v.10, p.85-90, 1986.

LIMA, J. S. de S. OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B. de; XAVIER, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira **R. Árvore**, Viçosa, MG, v.32, n.5, p.931-938, 2008.

LIMA, J. S. de S.; OLIVEIRA, R. B. de; SILVA, J. M. da; QUARTEZANI, W. Z.; SILVA, S. de A. Desenvolvimento de espécies de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urograndis* em solo com presença de camada compactada. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.14, n.2, 101-107, Abr./Jun, 2006.

LOPES, E. da S.; SAMPIETRO, J. A., PEREIRA, A. L. N., OLIVEIRA, D. de. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego de *skidder* com diferentes rodados. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 3, p. 471-480, jul./set. 2011.

LOPES, E. da S.; SAMPIETRO, J. A.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal **R Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011.

LOPES, E. S. **Aplicação do programa SNAP III (Scheduling and Network Analysis Program) no planejamento da colheita e do transporte florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2a ed. Viçosa, MG, Ed. UFV, 2008.

MACHADO, C. C. **Exploração florestal**, 6, Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1989. 34p.

MALINOVSKI, R. A. **Otimização da distância de extração de madeira com forwarder**. 2007. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOWSKI, J. R. Evolução dos sistemas de colheita de Pinus na região sul do Brasil. Curitiba, PR: **FUPEF**, 1998. 138 p.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. *Econ. Geol.*, 58:1246-1266, 1963.

McDONALD, T. P.; SEIXAS, F. Effect of Slash on Forwarder Soil Compaction. **Journal of Forest Engineering**. 1995.

MCMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. **LIRO** report, v.9, n.1, p.1-8, 1994.

MORKOC, F.; BIGGAR, J. W.; MILLAR, R. J.; NIELSEN, D. R. Statistical analysis of sorghum yield: a stochastic approach. **Soil Science Society of America Journal**, p.49, p.1342-1348, 1985.

PERUMPRAL, J. V. Cone penetrometer application - A review. **Transactions of the**

**American Society of Agricultural Engineering**, v.30, n.4, p.939-944, 1987.

PEZZONI FILHO, J. C. **Compactação de um cambissolo háplico com o tráfego de um trator skidder no arraste de *Pinus elliottii***. 2011. 89f. (Dissertação). Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp. Botucatu, SP, 2011.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**, p. 446, Curitiba, 1996.

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

RAB, M. A. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia. **For Ecol Manage**, v.84, p.159-176, 1996.

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

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume v. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. V.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 16., Aracaju, 2006. **Palestras**. Aracaju, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. CD-ROM.

REINERT, D.J.; COLLARES, G.L.; REICHERT, J.M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: Desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.304-316, 2007.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de uma Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. **R Bras Ci Solo**, 32: 1817-1825, 2008.

RÍPOLI, T.C.C. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: CALQ, 1985. 34p.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: Geostatistics for environmental sciences: version 5.1 for windows. [S.l.]: Gamma Design Software, 152 p., 1998.

ROLOFF, G. **Aspectos dinâmicos da estrutura de solos agrícolas e seu estudo**. Washington: Embaixada do Brasil, 1986.

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

RUARK, G. A.; MADER, D. L.; TATTAR, T. A. The influence of soil compaction and aeration on the root growth and vigour of trees – a literature review. Part I. **Arboricultural Journal**, v.6, p.251-265, 1982.

SALIRE, E.V., HAMMEN, J.E., HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil Till Res**, v.31, p.235-248, 1994.

SAMPIETRO, J. A. **Compactação de cambissolo e neossolos causada pela colheita de madeira com Feller-Buncher e Skidder**. 2010. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2010.

SANTOS, O. M. **Efeito de fungo micorrízico vesículo-arbuscular sobre o crescimento e a absorção de fósforo, de nitrato e de amônio por mudas de *Eucalyptus grandis* Hill, ex Maiden e de *E. camaldulensis* Dehnh., sob estresse hídrico e solo compactado**. 1995. 77f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

SEIXAS, F. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. **IPEF**: Piracicaba, SP. 2002. p. 313-350.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; COSTA, L. G. Soil compaction and GPS determination of impacted area by skidder traffic. In: FOREST ENGINEERING CONFERENCE, 2, 2003, Växjö, Suécia. **Proceedings – Posters**; Technique and Methods. Uppsala: Skogforsk, 2003. p.124-129.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de *forwarder* com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, n.63, p.178-187, 2003.

SEIXAS, F.; McDONALD, T. P.; STOCKES, B. J.; RAPER R. L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 18., Cashiers, 1995. **Proceedings**. Cashiers, 1995. p.77-86.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. de.; SOUZA, C. R. de. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia forestalis**. n. 54, p. 9-16, Dez. 1998.

SEIXAS, F.; SOUZA, C. R. de. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. **R Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.6, p.1047-1052, 2007.

SEIXAS, F.; SOUZA, C.R.S. The use of bulk density and cone penetrometer resistance as indicators to evaluate the influence of forestry machine traffic on soil compaction. In: IUFRO CONFERENCE ON INDICATORS FOR SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT, Melbourne, 1998. **Proceedings**. Melbourne, Natural Resources and Environment, 1998. p.156-157.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C. & DENTON, H. P. Relationships of texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci Soc Am**, Madison, 49:422-427, 1985.

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.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R Bras Ci Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. Assessing compaction susceptibility of South African Forestry soils. I. The effect of soil type water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil Till Res**, v. 41, p. 53-73, 1997. Amsterdam.

SMITH, H., DICKSON, L. The contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 46, 13–29, 1992.

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

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

SOANE, B.D. The role of field traffic studies in soil management research. **Soil Till Res**. 1, 205–237, 1980.

SOBRINHO, V. F. A importância do Brasil no mercado internacional de madeira e derivados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 2, 1995, Salvador. **Anais...** Salvador: SIF, 1995. p.52-63.

STARTSEV, A. D.; McNABB, D. H. Effects of compaction on aeration and morphology of boreal forest soils in Alberta, Canada. **Canadian Journal of Soil Science**, n.89, p.45-56, 2009.

TANAKA, O. P. **Exploração e transporte da cultura do eucalipto**. Informe Agropecuário, n.141, p. 24-30, 1986.

TAYLOR, H. M., GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength soil. **Soil Science**, v.96, p.153-156, 1963.

TAYLOR, J. H.; BURT, E. C.; MONROE, G. E. **Effect of dualing tires on soil compaction**. St Joseph: ASAE, 1989. 7p. (ASAE. Paper, 89 – 1052).

TELÊMACO BORBA. **Plano diretor, ano base de 2005**. 2005.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSoja, 1999. 58p. Circular Técnica, n. 23.

TROUSE JR., A. C. **Root tolerance to soil impediments**. In: Crop tolerance to subtropical land conditions. Madison, ASA/ACSSA/SSSA, 1978. P.193-232.

VANDENBERG, G. E.; GILL, W. R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, v.5, n.2, p.105

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAES, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E G. R. Tópicos em ciências do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.2-54.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.1040-1048, 1981.

WRONSKI, E.B. 1980. **Logging trials near Tumut**. *Logger*, April/May:10-14.

WRONSKI, E.B. Impact of tractor thinning operations on soils and tree roots in a karri forest, Western Australia, **Australian Forest Research**, 14:319-32, 1984.

YATES, S. R.; WARRICK, A. W.; MATTHIAS, A. D.; MUSIL, S. Spatial variability of remotely sensed surface temperatures at field scale. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.40-45, 1988.

ZHANG, H.; HARTGE, K. H. & RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Sci Soc Am. J.**, 61:239-245, 1997.

ZIMBACK, C. R. L. **Apostila de cartografia**. 2001. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/intranet/arquivos/Apostila%20Cartografia.pdf>>. Acesso em: 8 de jan. de 2013.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, 28:947-958, 2000.