

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**IMPACTO DO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE
COLHEITA DA MADEIRA NA QUALIDADE FÍSICA
DE UM NITOSSOLO BRUNO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TAMARA IZABEL DE ANDRADE PAYÁ

IRATI – PR

2016

TAMARA IZABEL DE ANDRADE PAYÁ

**IMPACTO DO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA NA
QUALIDADE FÍSICA DE UM NITOSSOLO BRUNO**

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. Eduardo da Silva Lopes - UNICENTRO

Orientador

Prof(a). Dr(a). Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli – UFPR

Coorientadora

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller - UNICENTRO

Coorientador

IRATI – PR

2016

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

P343i	<p>PAYÁ, Tamara Izabel de Andrade.</p> <p>Impacto do tráfego de máquinas de colheita da madeira na qualidade física de um Nitossolo Bruno / Tamara Izabel Andrade Payá. – Irati, PR : [s.n], 2016. 70f.</p> <p>Orientadora: Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes Coorientadora: Profª Drª Karina Maria V. C. Polizeli Coorientador: Prof. Dr. Marcelo M. L. Müller</p> <p>Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de Concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR.</p> <p>1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Solo – solos – compactação. 3. Sustentabilidade. I. Lopes, Eduardo da Silva. II. Polizeli, Karina Maria Vieira Cavalieri. III. Müller, Marcelo Marques Lopes. IV. UNICENTRO. V.. Título.</p> <p>CDD 634.98</p>
-------	---

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

PARECER

Defesa Nº 90

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 **Tamara Izabel de Andrade Payá** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**IMPACTO DO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA NA QUALIDADE FÍSICA DE UM NITOSSOLO BRUNO**", 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, 02 de março de 2016.



Dra. Karina Maria Vieira Cavaliéri Polizeli
Universidade Federal do Paraná
Primeira Examinadora



Dr. Jean Alberto Sampietro
Universidade do Estado de Santa Catarina
Segundo Examinador



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

A Deus
AGRADEÇO.

Aos meus pais Nilza Maria de Andrade e
Luiz Carlos Payá, a quem devo tudo o que
conquistei.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio e
incentivo.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado o dom da vida e por sempre ter mostrado os caminhos certos;

Aos meus pais quero, além de agradecer pela vida que me deram, dizer muito obrigada pela educação e pelos princípios ensinados desde o meu nascimento;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e a Universidade Estadual do Centro-Oeste, pelo apoio a este trabalho;

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

À Santa Maria Cia. de Papel e Celulose, pelo grande apoio e interesse para a realização desta pesquisa, e aos seus funcionários por toda ajuda e disponibilidade durante as atividades de campo;

Ao Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes, pela orientação, perseverança, confiança, compreensão e pelas ajudas durante esses dois anos de Pós-Graduação;

Aos coorientadores Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli e Marcelo Marques Lopes Müller, por toda dedicação e apoio no desenvolvimento e conclusão deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais: Dr^a. Kátia Cylene Lombardi, Dr. Luciano Farinha Watzlawick; Dr^a. Andrea Nogueira Dias e Dr. Flávio Augusto de Oliveira Garcia, pelas sugestões e ensinamentos;

Aos professores da Universidade Estadual do Centro-Oeste da unidade de Guarapuava Dr^a. Aline Marques Genú e Dr. Cristiano André Pott, por toda a ajuda, paciência e bondade que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho;

Ao Luiz Henrique de Lima, Danúbia Bento e Ana Carolina Klessner, estagiários do Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da UNICENTRO, unidade de Guarapuava-PR, por toda ajuda e paciência;

A responsável técnica do Laboratório de Solos Florestais, Odimeia Teixeira e a estagiária Luciele Stoks, pelas sugestões, ensinamentos e ajudas;

Ao Matheus Kaminsk Candido Silva, colaborador deste projeto de pesquisa, por toda ajuda e companheirismo no campo;

Aos colegas e amigos da pós-graduação, em especial Ana Paula Micali Figueiredo, Cristian Reinelli, Isabel Homczinski, Jocasta Lerner, Mário Rodolfo Boff Burgin, Murilo Malheiros, Sueza Basso e Tiago Grespan, pela amizade, dedicação e companheirismo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1.INTRODUÇÃO.....	1
2.OBJETIVOS.....	3
2.1.Objetivo geral.....	3
2.2.Objetivos específicos.....	3
3.REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1.Setor de florestas plantadas no Brasil.....	4
3.2.Colheita da madeira.....	5
3.2.1.Conceito.....	5
3.2.2.Etapas da colheita da madeira.....	5
3.2.3.Sistemas de colheita da madeira.....	6
3.2.4.Principais máquinas e equipamentos.....	8
3.3.Compactação do solo.....	9
3.3.1.Conceito.....	9
3.3.2.Fatores de influência na compactação.....	10
3.3.3.Efeito da compactação.....	16
3.4.Atributos físicos do solo.....	17
3.4.1.Densidade do solo.....	17
3.4.2.Porosidade do solo.....	18
3.4.3.Resistência mecânica do solo à penetração.....	19
3.4.4.Ensaio de Proctor normal.....	20
3.4.5.Formação de sulcos no solo.....	21
3.5.Medidas mitigadoras da compactação do solo.....	22
4.MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1.Caracterização da área de estudo.....	23

4.2.Sistema de colheita da madeira.....	25
4.3.Procedimento amostral.....	27
4.4.Avaliação dos atributos físicos do solo.....	29
4.4.1.Análise granulométrica.....	29
4.4.2.Formação de sulcos no solo.....	30
4.4.3.Pressão estática exercida pelas máquinas no solo.....	30
4.4.4.Densidade do solo.....	32
4.4.5.Porosidade total, microporosidade e macroporosidade.....	33
4.4.6.Resistência mecânica do solo à penetração.....	35
4.4.7.Ensaio de Proctor normal.....	36
4.5.Análise Estatística.....	37
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1.Análise granulométrica e teor de carbono orgânico.....	39
5.2.Formação de sulcos no solo.....	40
5.3.Densidade do solo.....	42
5.4.Porosidade total.....	44
5.5. Microporosidade.....	46
5.6.Macroporosidade.....	48
5.7.Resistência mecânica do solo à penetração.....	50
5.8.Ensaio de Proctor normal.....	56
6.CONCLUSÕES.....	60
7.RECOMENDAÇÕES.....	61
8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Campina do Simão - PR.....	23
Figura 2. Perfil do solo localizado na Fazenda Serro Verde (Campina do Simão – PR).....	24
Figura 3. Trator florestal <i>feller direcional</i>	26
Figura 4. Trator florestal <i>skidder</i>	27
Figura 5. Trator florestal <i>harvester</i>	27
Figura 6. Esquema amostral ilustrando o procedimento de instalação dos blocos a campo e as profundidades de coleta das amostras não deformadas de solo.....	29
Figura 7. Amostragem de como foi medido a formação de sulcos.....	30
Figura 8. Rodados de esteira do <i>feller direcional</i> demarcados com cal (A) e medição do diâmetro do pneu do <i>skidder</i> utilizando fita métrica (B).....	31
Figura 9. Trado de amostras indeformadas (TAI) (A) e anel volumétrico preenchido com solo (B).....	33
Figura 10. Anéis volumétricos em processo de saturação.....	34
Figura 11. Medição da resistência mecânica à penetração com o uso do penetrômetro digital.....	35
Figura 12. Forma de como foram realizados os 26 golpes nas amostras, com o soquete compactador de Proctor, para construção da cada camada compactada.....	36
Figura 13. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	51
Figura 14. Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) momento das leituras de resistência mecânica do solo à penetração do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	51
Figura 15. Curvas de compactação realizadas pelo ensaio de Proctor normal do Nitossolo Bruno nas quatro profundidades avaliadas.....	56
Figura 16. Curvas de compactação realizadas pelo ensaio de Proctor Normal do Nitossolo Bruno nas quatro profundidades avaliadas em relação ao teor de argila.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do povoamento de <i>Pinus taeda</i> L. estudado.....	24
Tabela 2. Análise granulométrica, teor de carbono orgânico e textura do perfil do solo	25
Tabela 3. Área e pressão estática de contato entre esteira/pneu/solo do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i> sem carga.....	32
Tabela 4. Valores médios da análise granulométrica, teor de carbono orgânico e textura do Nitossolo Bruno nas profundidades estudadas.....	39
Tabela 5. Valores médios e desvio padrão (\pm) da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), profundidade (cm) e largura (cm) de sulco do Nitossolo Bruno estudado após as diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	40
Tabela 6. Valores médios e desvio padrão (\pm) da densidade do solo (Mg m^{-3}) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	42
Tabela 7. Valores médios e desvio padrão (\pm) da porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	45
Tabela 8. Valores médios e desvio padrão (\pm) da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	47
Tabela 9. Valores médios e desvio padrão (\pm) da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	48
Tabela 10. Valores médios e desvio padrão (\pm) da resistência do solo à penetração (MPa) e de umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), do Nitossolo Bruno estudado em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do <i>feller direcional</i> e <i>skidder</i>	54
Tabela 11. Densidade do solo máxima (Mg m^{-3}), umidade ótima (kg kg^{-1}), umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}), densidade do solo após o tráfego das máquinas (Mg m^{-3}), e grau de compactação (%) do Nitossolo Bruno estudado nas quatro profundidades diferentes avaliadas neste trabalho.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

cm	Centímetro
cm³	Centímetro cúbico
cm²	Centímetro quadrado
cm s⁻¹	Centímetro por segundo
Corg	Carbono orgânico
CV	Coefficiente de variação
Ds	Densidade do solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
g	Gramma
g cm⁻³	Gramma por centímetro cúbico
g dm⁻³	Gramma por decímetro cúbico
g kg⁻¹	Gramma por quilograma
ha	Hectare
HP	Horse power
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
kg kg⁻¹	Quilograma por quilograma
kg m⁻³	Quilograma por metro cúbico
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
Lb	Libras
m	Metro
MA	Macroporosidade
Mg m⁻³	Megagramma por metro cúbico
MI	Microporosidade
mm	Milímetro
mm µm	Milímetro por micrometro
MPa	Mega Pascal

M_{ss}	Massa do solo seco
m³	Metro cúbico
m³ m⁻³	Metro cúbico por metro cúbico
m³ ha	Metro cúbico por hectare
m² ha	Metro quadrado por hectare
N	Newton
n^o ha	Número de árvores por hectare
%	Percentual
P_c	Pressão de contato
PT	Porosidade total
RP	Resistência mecânica à penetração
T	Tonelada
U_g	Umidade gravimétrica
U_v	Umidade volumétrica
V	Volume
V_{ar}	Volume de ar
V_a	Volume de água

RESUMO

TAMARA IZABEL DE ANDRADE PAYÁ. **Impacto do tráfego de máquinas de colheita da madeira na qualidade física de um Nitossolo Bruno.**

O intenso tráfego das máquinas de colheita da madeira pode ocasionar danos severos ao solo, afetando a qualidade dos recursos físico-hídricos e a sustentabilidade da produção florestal. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a compactação e a formação de sulcos em um Nitossolo Bruno causada por diferentes intensidades de tráfego dos tratores florestais *feller direcional* e *skidder*. O estudo foi realizado em uma empresa florestal localizada no município de Campina do Simão, Estado do Paraná, em povoamento de *Pinus taeda* com idade de 12 anos e volume individual médio de 0,37 m³. O solo da área de estudo foi classificado como um Nitossolo Bruno de textura argilosa. A pesquisa contemplou cinco tratamentos, definidos pelas seguintes simulações de tráfego: Sem tráfego (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK); 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK); 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK) e 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK). O procedimento amostral foi realizado por meio da instalação de quatro blocos, distribuídos de forma aleatória no talhão. A compactação foi determinada pela densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e resistência mecânica à penetração. A formação de sulcos no solo foi avaliada após cada intensidade de tráfego das máquinas de colheita da madeira. A densidade máxima do solo e a umidade ótima de compactação foram determinadas por meio do ensaio de Proctor normal. Os resultados mostraram que o tráfego das máquinas contribuíram para a formação de sulcos no solo, com maior destaque para 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder*, que formou sulcos com profundidade média de 16,03 cm e largura média de 127,87 cm. As diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e do *skidder* causaram alterações significativas nos parâmetros físicos do solo, principalmente nas maiores intensidades de tráfego e nas camadas superficiais do solo. Todos os tratamentos avaliados apresentaram resistência mecânica à penetração com valores acima de 2 MPa na camada de 0-25 cm, limite considerado crítico ao desenvolvimento das plantas, reforçando a necessidade de realização da subsolagem e do manejo do solo antes da implantação da floresta. O ensaio de Proctor normal mostrou que a densidade máxima do solo para a camada de 0-10 cm foi de 1,25 Mg m⁻³ e que a umidade ótima foi de 0,41 kg kg⁻¹, porém os valores médios de densidade do solo observados neste trabalho não chegaram ao seu valor máximo, assim como nas demais camadas avaliadas de 10-20, 20-40 e 40-60 cm. De maneira geral, o tráfego do *feller direcional* e do *skidder* contribuiu para a ocorrência de maiores alterações nos atributos físicos do solo em relação à condição inicial (sem tráfego), afetando principalmente as camadas superficiais, confirmando a necessidade da adoção de medidas para reduzir e controlar a compactação do solo.

Palavras-chave: Compactação do solo; intensidade de tráfego; colheita da madeira; solos florestais.

ABSTRACT

TAMARA IZABEL DE ANDRADE PAYÁ. **Impact of wood harvesting machines traffic on the physical quality of a Nitossolo Bruno.**

The heavy traffic of timber harvesting machines can cause severe damage to the soil, affecting the quality of physical-hydric resources as well the sustainability of forestry production. Considering that, the purpose of this study is to evaluate the soil compaction and the rut depth formation in Nitossolo Bruno caused by the different traffic intensity of forestry tractors, *the direcional feller* and the *skidder*. The study was taken in a forestry company in Campina do Simão, State of Paraná, in *Pinus taeda* stands with 12 years old and individual average volume of 0,37 m³. The soil studied in the area was classified as Nitossolo Bruno with clay texture. The research behold five kinds of treatment, defined by the following traffic simulation: No Traffic (Control); 1 passage of the *direcional feller* + 1 passage of the *skidder* (1 TF + 1 SK); 1 passage of the *direcional feller* + 2 passages of the *skidder* (1 TF + 2 SK); 1 passage of the *direcional feller* + 4 passages of the *skidder* (1 TF + 4 SK); and 1 passage of the *direcional feller* + 8 passages of the *skidder* (1 TF + 8 SK). The soil sample procedure was accomplished by installing four blocks randomly allocated on the plot. The compaction process was determined by the soil bulk density, total porosity, microporosity, macroporosity and mechanical resistance to penetration. The soil furrowing was assessed after the moments of high harvester traffic intensity. The maximum soil bulk density and the optimum moisture to occur the maximum compaction was established through standard Proctor test. The results reveal that the *direcional feller* and the *skidder* traffics caused significant changes to the physical soil parameters, mainly in the larger traffic intensity and in the soil surface layers. All the measured treatments show mechanical resistance to penetration values above 2 MPa at 0-25 cm layer, value considered as critical level to the plants growing, which reinforces the need to perform the subsoil before implanting the forest. The assay showed that normal maximum Proctor density of the soil to the 0-10 cm layer was 1,25 Mg m⁻³ and the optimum moisture content was 0,41 kg kg⁻¹, but the average density values soil observed in this study did not reach their maximum value, as well as other layers evaluated 10-20, 20-40 and 40-60 cm. The machines traffic provided for soil furrowing, with higher emphasis to 1 passage of the *direcional feller* + 8 passages of the *skidder*, which caused furrows 16,03 cm of depth and 127,87 cm of width. The standard Proctor test revealed that the maximum soil density to the 0-10 cm layer was 1,25 Mg m⁻³ and the optimum moisture was 0,41 kg kg⁻¹, however the average values of bulk density observed in this study did not reach their maximum value, as well as the other evaluated layers which presented 10-20, 20-40 e 40-60 cm. In general, the *direcional feller* and the *skidder* traffics caused compaction and contributed to furrowing, confirming the need to adopt measures to reduce and control the soil compaction.

Keywords: Soil compaction; traffic intensity; wood harvesting; forest soils.

1. INTRODUÇÃO

O uso de máquinas de colheita da madeira no Brasil teve seu início na década de 1970, época em que as indústrias começaram a produzir maquinários de porte leve e médio. Na década de 1990, devido ao custo elevado de mão-de-obra, e a abertura do mercado nacional para a importação de produtos surgiu a necessidade de se desenvolver máquinas florestais que tinham como objetivo aumentar a produtividade, melhorar a qualidade das operações e reduzir os custos (MACHADO et al., 2014). Com o avanço da tecnologia, as máquinas de colheita da madeira se tornaram mais pesadas devido a maior capacidade de carga e potência. Por outro lado, contribuem com a ocorrência de impactos negativos ao solo, além de afetar a capacidade e a sustentabilidade da produção florestal.

Dentre os sistemas de colheita da madeira existentes no Brasil, destaca-se o de árvores inteiras (*full tree*), caracterizado pelo uso do *feller buncher* ou *feller direcional*, *skidder* e *harvester* processador, que são máquinas de grande porte e potência, e podem causar a compactação e danos ao solo. Tal fato é agravado pela inexistência de biomassa residual resultante do processamento da madeira na área de corte, pois neste sistema, as árvores são processadas nas margens dos talhões, fazendo com o que os rodados das máquinas tenham um contato direto com a superfície do terreno causando a maior compactação do solo.

A compactação consiste no aumento da densidade e redução do seu volume, em virtude das cargas ou pressões aplicadas sobre a superfície do solo. Isso se deve ao aumento da compactação, que causa o decréscimo da porosidade total, devido à mudança na estrutura das partículas e agregados do solo e à expulsão de ar dos poros (FENNER, 2014). A compactação do solo pode ser determinada por meio de parâmetros físicos estruturais, como: densidade, porosidade (macroporosidade e microporosidade) e resistência à penetração. Por meio destes parâmetros, é possível quantificar as perdas estruturais do solo e determinar os possíveis danos e limitações ao desenvolvimento das plantas.

Entre os principais fatores que causam a compactação cita-se a intensidade de tráfego das máquinas, que aliada ao manejo incorreto do solo e ao peso excessivo das máquinas florestais, sobrepõe pressões ao solo maiores em relação à capacidade de suporte de carga, ocasionando incremento na densidade do solo, redução dos macroporos, menor infiltração de água e, conseqüentemente, redução do desenvolvimento das plantas e restrições ao crescimento radicular.

Além disso, o tráfego intensivo das máquinas de colheita da madeira pode contribuir para a formação de sulcos no solo, principalmente quando o sistema de colheita adotado é o de árvores inteiras, com as máquinas trafegando sobre a área de corte sem a presença de resíduos florestais, afetando assim, a qualidade do solo em razão do aumento do processo erosivo e redução da produtividade do sítio. Uma alternativa para reduzir o impacto causado ao solo pelo tráfego das máquinas é a manutenção dos resíduos florestais na área de tráfego, que tem a finalidade de distribuir as pressões aplicadas sobre a superfície do solo, evitando que a sua capacidade de suporte de carga seja superada, a fim de minimizar a formação de sulcos ocasionados pelo tráfego das máquinas, além de contribuir com a redução da compactação.

Desse modo, com a probabilidade de redução da produção florestal ocasionada pela degradação da qualidade física do solo em razão do intenso tráfego de máquinas da colheita da madeira, as empresas do setor florestal vêm demonstrando interesse na forma de como identificar, quantificar, minimizar e solucionar os problemas ocasionados pela compactação.

Por isso, a realização de estudos que permitem avaliar e quantificar a compactação e os danos causados ao solo pelo tráfego das máquinas de colheita da madeira é de grande importância na busca por melhorias no processo de gestão das operações e no auxílio na tomadas de decisões, levando em consideração as relações entre o solo, máquina e planta, buscando a continuidade das atividades florestais com o mínimo de impacto negativo ambiental, social e econômico ao longo das rotações.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a compactação e a formação de sulcos em um Nitossolo Bruno causado por diferentes intensidades de tráfego dos tratores florestais *feller direcional* e *skidder* em povoamento de *Pinus taeda* L.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o efeito da intensidade de tráfego das máquinas de colheita da madeira na compactação do solo;
- Determinar a densidade máxima do solo em função da umidade ótima, e;
- Verificar a ocorrência de formação de sulcos no solo causado por diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Setor de florestas plantadas no Brasil

O setor florestal brasileiro ganhou impulso no final da década de 1960, por meio da política dos incentivos fiscais oferecidos pelo governo federal, que tinha por objetivo diminuir a exploração dos recursos florestais naturais e aumentar as áreas de florestas plantadas (MACHADO et al., 2014).

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015), a área de florestas plantadas no Brasil alcançou 7,74 milhões de hectares em 2014, com crescimento de 1,8% em relação ao ano de 2013. Deste total, os plantios de *Eucalyptus* representam 5,56 milhões de hectares, enquanto de *Pinus* correspondem a 1,59 milhões de hectares. Com relação ao uso e ocupação do solo no Brasil, as áreas de florestas plantadas corroboram com apenas 0,9% de todo o território nacional, sendo que 66,1% são ocupados por áreas naturais, 23,3% por pastagens, 6,2% por agricultura e 3,5% por redes de infraestrutura e áreas urbanas.

No ano de 2014, o setor de florestas plantadas apresentou um crescimento de 1,7% do PIB (Produto Interno Bruto), sendo este crescimento considerado excelente quando comparado com a agropecuária (0,4%), indústria (-1,2%) e setor de serviços (0,7%). Além disso, o setor foi responsável pela movimentação de U\$\$ 8,49 bilhões em exportação, apresentando aumento de 2,5% em comparação ao ano de 2013 (IBÁ, 2015).

De acordo com o mesmo autor, em relação ao aspecto social, o setor de florestas plantadas beneficiou no ano de 2014 em torno de 2 milhões de pessoas com a geração de empregos, além de assegurar saúde, cultura, educação e a qualidade de vida aos trabalhadores diretos e indiretos. Quanto aos aspectos ambientais, o setor de florestas plantadas contribuiu com a recuperação de áreas degradadas e formação de corredores ecológicos, atendendo as legislações florestais e certificações.

Por fim, ressalta-se a grande diversidade de produtos obtidos por meio das florestas plantadas, compreendendo uma série de atividades incluindo a produção, a colheita e a modificação da madeira para a obtenção de diversos produtos nas utilizados pelas indústrias de papel e celulose (36,1%), siderurgia (15,2%), madeira serrada (3,7%), enquanto o restante (26,3%) se refere à produção de lenha e demais produtos florestais (MACHADO et al., 2014).

3.2. Colheita da madeira

3.2.1. Conceito

A colheita de madeira pode ser definida como um conjunto de atividades efetuadas no maciço florestal, objetivando preparar a madeira e levá-la até o seu local de transporte, adotando normas específicas, de acordo com a finalidade de transformá-la em produto final (TANAKA, 1986), enquanto para a FAO (2013), refere-se a um conjunto de operações que vão desde a derrubada das árvores até o seu transporte no pátio da indústria consumidora.

Conceitualmente, o processo de colheita da madeira compreende as seguintes etapas: corte (derrubada, desgalhamento, destopamento, traçamento, empilhamento ou enleiramento) e extração da madeira. De acordo com Malinovski et al. (2014), as atividades de colheita mecanizada e transporte da madeira em florestas plantadas podem ser consideradas as atividades mais onerosas de todo o ciclo florestal, correspondendo de 60 a 70% dos custos totais da madeira posta na indústria.

3.2.2. Etapas da colheita da madeira

3.2.2.1. Corte

O corte é a primeira atividade da colheita da madeira que compreende as operações de derrubada, desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento ou enleiramento. Essa etapa é considerada uma operação de grande importância devido ser a primeira fase do preparo da madeira, além de exercer influência nas etapas subsequentes (SANT'ANNA, 2014).

O corte das árvores pode ser executado de forma manual, utilizando ferramentas como serra manual e machado; de forma semimecanizada, por meio do uso de motosserras; e de forma mecanizada, empregando as máquinas de colheita florestal como *harvester*, *feller buncher* ou *feller direcional*.

3.2.2.2. Extração

A extração da madeira refere-se à retirada ou remoção da madeira desde a área de corte até a margem do talhão ou pátio intermediário. Segundo Seixas e Castro (2014), existem vários sinônimos que podem ser empregados nessa atividade, em função do modo como é realizado o transporte e o tipo de equipamento utilizado, sendo: arraste, quando parte ou a totalidade da árvore se encontra apoiada sobre o solo no momento da retirada da madeira, podendo ser destacado o uso do trator florestal *skidder*; baldeio, quando a madeira, na forma de toras, é retirada e apoiada sobre uma plataforma, utilizando um *trailer* ou um trator florestal autocarregável *forwarder*; cabos aéreos referem-se à movimentação da madeira do local da área de corte até um pátio intermediário ou até as margens dos talhões realizada por um sistema de cabos e roldanas; e transporte direto, quando a madeira é retirada de dentro da floresta por um caminhão que realiza o transporte até a indústria.

A extração da madeira é considerada uma etapa complexa, pois é influenciada por diversos fatores como habilidade e experiência do operador, as características do terreno e do povoamento, tipo de solo e a distância de extração.

3.2.3. Sistemas de colheita da madeira

De acordo com Machado et al. (2014), sistema de colheita da madeira pode ser definido como um conjunto de operações integradas entre si, permitindo o fluxo constante da madeira, de modo que não haja pontos de estrangulamento e induzindo a máxima produção dos equipamentos. O autor retrata que os sistemas de colheita da madeira podem alterar-se de acordo com a topografia do terreno, o tipo da floresta, rendimento volumétrico do povoamento, o uso final da madeira, tipo das máquinas, equipamentos e recursos disponíveis.

Segundo a classificação da FAO citada por Machado et al. (2014), os sistemas de colheita da madeira podem ser classificados de acordo com a forma da madeira na etapa de extração, o local onde é realizado o processamento final da madeira e o nível de mecanização adotado, sendo a primeira forma a mais utilizada e definida como: sistema de toras curtas (*cut to length*), sistema de árvores inteiras (*full tree*), sistema de toras longas (*tree length*), sistema de árvores completas (*whole tree*) e sistema de cavaqueamento (*chipping*), sendo os primeiros os mais utilizados no Brasil.

Além disso, o sistema de colheita da madeira também pode ser classificado de acordo com o tempo em que a matéria-prima permanece no campo, seguida pelo seu transporte até ao pátio da indústria consumidora, como: colheita quente (*hot log*), em que as toras de madeira são retiradas rapidamente da área de colheita e levadas até indústria; e colheita a frio (*cold log*), em que as toras de madeira não são retiradas rapidamente da área de colheita, permanecendo no campo por um longo período de tempo.

3.2.3.1. Sistemas de toras curtas (*cut to length*)

É o sistema onde todas as etapas do corte (derrubada e processamento) são realizadas no interior do talhão, sendo seguida pela extração da madeira, normalmente na forma de baldeio para a margem do talhão, estradas ou pátio intermediário (temporário ou permanente), em toras de 1 a 6 m de comprimento (MACHADO et al., 2014).

Os principais equipamentos que compõe esse sistema, quando mecanizado são: *harvester* e *forwarder*, onde a primeira realiza o corte, processamento e empilhamento da madeira, enquanto a segunda executa o baldeio das toras.

As principais vantagens deste sistema de colheita da madeira são: facilidade no manuseio das toras; eficiência no regime de desbastes; baixo impacto ambiental em termos de compactação, devido às máquinas trafegarem em contato com a biomassa residual na área de corte; e baixa exportação de nutrientes. Como desvantagens destacam-se: dificuldade no reaproveitamento da biomassa residual e maior custo devido ao manuseio excessivo da madeira.

3.2.3.2. Sistemas de árvores inteiras (*full tree*)

É o sistema de colheita da madeira onde apenas a derrubada da árvore é realizada no interior do talhão, sendo em seguida transportada para a margem do talhão, estrada ou pátio intermediário onde ocorre o processamento final da madeira (MACHADO et al., 2014). Este sistema de colheita, geralmente quando mecanizado é composto pelos seguintes equipamentos: *feller buncher*, *skidder* e *harvester*, onde o primeiro possui a função de realizar o corte das árvores, dispondo-as em feixes, de modo que o segundo equipamento executa o arraste das árvores, e por fim, o terceiro realiza o processamento final da madeira.

De acordo com Malinovski et al. (2014), o sistema de árvores inteiras exige um elevado grau de mecanização e geralmente é aplicado para colheita de árvores de grande porte, exigindo máquinas e equipamentos especialmente designados para esse tipo de operação, podendo ser realizada, tanto em relevos planos quanto nos acidentados.

Esse sistema é característico por ocasionar vários danos ao solo, pois na área de derrubada das árvores há pouca quantidade de biomassa residual, fazendo com o que as máquinas tenham um contato direto com a superfície do solo, contribuindo para que ocorra a compactação do solo e a formação de sulcos.

As principais vantagens desse sistema são: maior eficiência das máquinas em áreas com topografia elevada; aproveitamento dos resíduos na produção de biomassa; maior rendimento das operações e menor custo de produção. Com relação às desvantagens destacam-se, maior possibilidade de ocorrência de compactação do solo, devido ao contato direto das máquinas com solo, facilitando a formação de sulcos e de erosões; maior exportação de nutrientes e necessidade de um planejamento eficiente das operações de colheita.

3.2.4. Principais máquinas e equipamentos

De acordo com Lima e Leite (2014), o setor de colheita da madeira apresenta uma grande variedade de máquinas e equipamentos que realizam as diferentes atividades e com múltiplos propósitos, sendo que os mais utilizados no Brasil são:

Harvester: Trator florestal responsável por realizar as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento, descascamento (opcional) e empilhamento da madeira. É composto por uma máquina base com potência do motor que varia entre 94 a 300 HP, rodados esteiras ou de pneus com tração que de 6 x 6 ou 8 x 8, uma lança hidráulica e um cabeçote;

Feller buncher: Trata-se de um trator florestal que possui a função de realizar o corte, acúmulo e empilhamento das árvores sobre o terreno. É composto por uma máquina base com potência de motor que varia entre 67 a 120 HP, rodados de esteiras ou de pneus, equipado com cabeçote de composto por um disco dentado, serra/sabre ou tesoura de dupla ação, e braços acumuladores, sendo que todos estes mecanismos são acionados pelo sistema hidráulico.

Feller direcional: Trata-se de um trator florestal que tem a função de realizar somente o corte e o tombamento das árvores individualmente, se diferenciando do *feller buncher* por não executar o acúmulo de árvores no seu cabeçote. É composto por uma máquina base, cuja

potência varia de acordo com o modelo e a marca da máquina, os rodados podem ser de esteiras ou pneus. O cabeçote é composto por uma serra/sabre, sendo que alguns modelos possuem capacidade de cortar uma árvore de até 90 cm de diâmetro.

Forwarder: Trata-se de um trator florestal autocarregável empregado na operação de extração da madeira na forma de baldeio do interior até a margem do talhão, estrada ou pátio intermediário. É composto por uma máquina com chassi articulado, cuja potência do motor varia entre 140 a 280 HP, rodados de pneus com tração 4 x 4, 6 x 6 ou 8 x 8, capacidade de carga variando entre 10 a 22 t e grua hidráulica com alcance de até 12 m.

Skidder: Trata-se de um trator florestal utilizado na operação de extração da madeira na forma de arraste do interior até a margem do talhão, estrada ou pátio intermediário. É composto por uma máquina articulada, potência do motor variando de 128 a 400 HP, rodados de esteiras ou de pneus com tração 4 x 4 ou 6 x 6, equipado com lâmina frontal e guincho ou garra. Podem ser classificados em *skidder de garra (grapple skidder)*, *skidder de cabo (chocker skidder)* e *skidder de garra invertida (clambunck skidder)*.

3.3. Compactação do solo

3.3.1. Conceito

A compactação consiste no rearranjo das partículas e dos agregados do solo, ou seja, têm suas formas e tamanhos alterados quando submetido a uma pressão contínua, resultando no aumento da densidade do solo e no decréscimo do espaço poroso (HAMZA; ANDERSON, 2005). Para Lima (2004), o termo compactação do solo se refere à redução do volume de poros não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, podendo ser causado por tráfego de máquinas e equipamentos e pisoteio animal.

Segundo Dias Júnior (2000), o adensamento do solo pode ser causado, tanto pela compactação derivada do manejo inadequado do solo, quanto por processos pedogenéticos. Neste aspecto, Curi et al. (1993) define que compactação é um processo onde ocorre a redução do volume do solo ocasionado por compressão, acarretando na redução da porosidade e no rearranjo mais denso das partículas do solo. Enquanto o adensamento é considerado a redução natural do espaço poroso, tendo como consequência o aumento da densidade das camadas do solo por iluviação de argilas, dessecação ou precipitação química, ou seja, um fenômeno natural.

O termo compactação é usado com frequência como sinônimo de densidade, pois por meio desse parâmetro físico do solo é possível notar tanto o aumento quanto a redução da compactação (FENNER, 2014). Acréscimos de valores de densidade do solo entre 15 a 20% maiores que seu valor inicial (condição sem tráfego das máquinas), são considerados prejudiciais para o desenvolvimento da cultura (SEIXAS, 2000; 2002).

3.3.2. Fatores de influência na compactação

3.3.2.1. Umidade do solo

A umidade é o principal fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo, pois a água presente nos poros atua como lubrificante das partículas, facilitando o rearranjo das mesmas quando o solo é submetido a diferentes pressões externas. Em determinadas ocasiões, quando a umidade fica próxima à capacidade de campo, o solo se torna mais suscetível à compactação, pois a sua desestruturação é favorecida (SILVA et al., 2000; FIGUEIREDO et al., 2000; SEIXAS, 2002).

Solos com baixos conteúdos de água são indicados para o tráfego de máquinas, pois contribuem de forma significativa para evitar uma elevada compactação, enquanto solos com altos teores de água são propícios à ocorrência de maior compactação, além de possibilitar a formação de sulcos no solo, causados pelos rodados das máquinas (SEIXAS, 2002; REICHERT, et al., 2010).

De acordo com Hillel (1998), a umidade é um fator influente na capacidade de suporte de carga do solo, pois quando seco o solo se torna mais coeso e resistente à compactação, porém à medida que ele vai ganhando umidade, acontece a formação de uma lâmina de água entre os agregados do solo, possibilitando o rearranjo e o deslocamento das partículas, tornando o solo mais susceptível à compactação.

Lopes et al. (2011a) avaliaram a compactação de um Cambissolo Húmico ocasionada pelo tráfego de máquinas florestais em três classes de umidade distintas, observando que houve incrementos na densidade do solo, aumento da resistência mecânica à penetração e redução da porosidade total, quando as operações de colheita da madeira foram realizadas sob maiores teores de água no solo.

Szymczak et al. (2014), estudando a compactação de um Latossolo Vermelho devido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira sob três condições de umidade (Ug: 44,76%; Ug: 42,18% e Ug: 39,98%), concluíram que a umidade do solo favoreceu a ocorrência da compactação.

3.3.2.2. Textura do solo

De acordo com Sato et al. (2011), a textura do solo exerce grande influência no processo de compactação quando uma determinada pressão externa é exercida sobre o solo, seja por máquinas agrícolas ou florestais. Após o tráfego das máquinas sobre o solo, ocorre um novo arranjo das partículas, que tende a diminuir o espaço poroso, aumentando assim, a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração, com consequente aumento da compactação.

Segundo Suzuki et al. (2008a), solos argilosos são capazes de suportar maiores pressões, porém são mais susceptíveis à compactação, devido a sua maior capacidade de retenção de umidade. Já solos com textura arenosa (grosseira) tendem a apresentar maior atrito entre as partículas, atrapalhando a movimentação dos elementos sólidos para maior proximidade, dificultando a deformação do solo (LIMA, 2004).

De acordo com Silva (2011), a textura do solo exerce grande influência na densidade do solo, dificultando a comparação entre solos com texturas diferentes, pois um determinado valor de densidade que indique a existência da compactação pode variar entre as diferentes classes texturais do solo.

Gregory et al. (2007) afirma que solos argilosos possuem maior resiliência, em razão do aumento na pressão da água nos poros que não foi expulsa durante a compactação, sendo que geralmente suporta parte das forças que são exercidas sobre o solo, podendo proteger a estrutura do solo contra a degradação. Após a retirada dessa força aplicada, a redistribuição da água que irá acontecer poderá fazer com que haja uma rápida recuperação elástica do espaço poroso que foi afetado, situação que reforça a importância de se planejar a intensidade de tráfego das máquinas sob uma condição adequada de umidade.

3.3.2.3. Matéria orgânica

Segundo Braida (2004), a matéria orgânica existente e o manejo da biomassa residual da floresta sobre a superfície do solo contribuem para uma maior atividade biológica, disponibilizando nutrientes para as plantas, além de contribuir com a minimização da compactação do solo. Hamza e Anderson (2005) e Vasconcelos et al. (2012) relatam que quando o solo apresenta uma quantidade de matéria orgânica elevada, este se torna menos susceptível à compactação, mesmo recebendo cargas externas sobre sua superfície, sejam pelo tráfego de máquinas agrícolas ou pisoteio animal.

Braida et al. (2006), avaliando o efeito da matéria orgânica sobre o comportamento mecânico de um Argissolo Amarelo de textura franco-arenosa e de um Nitossolo Vermelho de textura argilosa, constataram que o aumento do teor de matéria orgânica fez com que a curva de compactação do solo se deslocasse para a direita e para baixo, apontando a redução da densidade máxima do solo e o aumento da umidade necessária para atingir a máxima compactação para ambos os solos estudados.

Quando ocorre a compactação do solo, os resíduos orgânicos podem atuar na dissipação da energia compactante resultante das forças externas atuantes sobre o solo, devido à baixa densidade desses resíduos superficiais, associado com sua susceptibilidade à deformação e elasticidade, onde então, a matéria orgânica torna-se potencialmente capaz de diminuir as cargas aplicadas sobre o solo (BRAIDA et al., 2011).

Por isso, controlar a intensidade de tráfego das máquinas florestais é uma atividade de grande importância para ajudar a diminuir a compactação. Neste aspecto, recomenda-se a adoção do manejo de solo e da matéria orgânica existente, com o intuito de reduzir os impactos causados pela passagem das máquinas, além de melhorar a taxa de infiltração de água no perfil do solo e contribuir para o desenvolvimento do sistema radicular (SANCHES, 2000).

3.3.2.4. Tipo e tamanho dos rodados

Uma das técnicas mais utilizadas para minimizar a compactação é o correto dimensionamento dos rodados, de modo a distribuir o peso da máquina sobre uma maior superfície de contato com o solo. Sendo assim, com o aumento da largura e diâmetro do pneu, a

área de contato entre pneu/solo se torna maior, proporcionando uma maior estabilidade para a máquina, além de reduzir os danos ocasionados ao solo (SOANE, 1980).

Aust et al. (1992), estudando as operações de colheita da madeira com *skidder* de pneus, observaram que a máquina equipada com rodados mais largos ocasionou menores danos ao solo em relação ao uso de pneus mais estreitos. Tal fato é explicado, pois os pneus mais largos distribuem o peso da máquina sobre uma maior superfície de contato com o solo, exercendo menor pressão sobre a área e acarretando, conseqüentemente, uma menor compactação do solo.

A utilização de rodados de esteira ou de pneus equipados com semiesteira contribui para a minimização dos impactos causados ao solo pelo tráfego das máquinas, em relação ao uso de rodados de pneus. Neste aspecto, Lopes et al. (2011b), comparando a compactação causada por *skidders* de rodados de pneus e de pneus equipados como semiesteira, verificaram que não ocorreu diferenças significativas entre as propriedades físicas do solo avaliadas, porém maiores acréscimos de densidade do solo foram observados em condições de tráfego do trator *skidder* com rodados de pneus ($1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$) nas camadas superficiais do solo de 0-15 e 15-30 cm, respectivamente, enquanto os valores de densidade do *skidder* de pneus equipado com semiesteira foram menores ($1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$).

3.3.2.5. Pressão no solo

As máquinas florestais por apresentarem grande porte e peso, normalmente exercem elevadas pressões sobre o solo, tanto por tratores de esteiras quanto de pneus. O tráfego das máquinas ocasionam diferentes vibrações e pressões sobre as partículas do solo, promovendo um rearranjo da sua microestrutura, dando origem a compressão de agregados menos resistentes e aproximação das partículas, reduzindo, conseqüentemente, o tamanho dos poros e sua continuidade (HORN, 1995).

De acordo com Seixas (2002), a distribuição da pressão sobre o solo ocasionada pelos rodados das máquinas irá depender dos seguintes aspectos: peso do equipamento que por sua vez irá determinar a pressão total sobre o solo; a área de contato entre o pneu/esteira com o solo, que irá determinar a pressão; a distribuição da força na área de contato; e o teor de água e densidade inicial do solo.

A pressão que as máquinas exercem sobre o solo é decorrente de um fator externo, que é expresso pela relação entre uma determinada força em a área de contato, além de ser dependente

das especificações do tipo de pneu, largura, pressão e inflação de ar (LIMA, 2004). No entanto, Lanças (2007) afirma que a calibragem correta do pneu contribui para uma redução de até 20% consumo de combustível da máquina, uma economia de até 7,5% no tempo de realização da atividade e principalmente uma redução de até 80% na compactação do solo.

Seixas (2000), estudando a compactação do solo ocasionada pela colheita de madeira, notou que o eixo traseiro da máquina tem a capacidade de suportar mais carga quando comparado ao eixo frontal. O autor relatou ainda que a pressão exercida pelos pneus dianteiros foi de aproximadamente 26 kPa e 80 kPa para os pneus traseiros, em uma atividade com o trator *skidder* de 6,5 t com carga máxima.

3.3.2.6. Peso da máquina

De acordo com Jorajuria e Draghi (2000), o peso da máquina é um fator que determina a profundidade de compactação do solo, independentemente da pressão aplicada sobre a sua superfície. Para Lima e Sirtoli (2006), a distribuição do peso das máquinas sobre a superfície do solo deixa claro que aquelas equipadas com rodados de esteira compactam menos o solo quando comparados com rodados de pneus. Isso ocorre devido a esteira apresentar maior superfície de contato sobre o solo, distribuindo melhor o peso e contribuindo para uma menor compressão por unidade de área.

De acordo com Reichert et al. (2007), a profundidade da compactação em áreas de florestas é maior em relação às áreas de produção agrícola e de pecuária. Os autores explicam que isso acontece devido ao maior peso das máquinas florestais e ao intenso tráfego durante a execução das operações de colheita da madeira. Além disso, outro fator influente é a umidade do solo que em áreas de florestas é maior, em virtude acúmulo de resíduos vegetais sobre a superfície do solo e o sombreamento propiciado pelas árvores que contribuem para que o fique mais úmido facilitando a ocorrência da compactação.

Fernandes e Souza (2003) avaliaram a compactação de um Latossolo Vermelho de acordo com diferentes intensidades de tráfego de um *forwarder* (com peso de 100 kN; peso médio de carga de 0,010 kN e pressão de contato por rodado de 152 kPa) ao longo da trilha de extração. Neste estudo, os autores verificaram que houve aumento da densidade do solo e que a compactação ocorreu principalmente na camada de 0-15 cm, enquanto pela avaliação da resistência à penetração ocorreu compactação entre as camadas de 0-15 e 15-30 cm.

Lopes et al. (2006a) trabalhando com compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa submetido ao arraste de madeira com *tracked skidder* (rodados de esteiras e massa de 21,5 kN) e *clambunk skidder* (rodados de pneus equipados com semiesteira e massa de 20,8 kN), observaram que os valores de densidade do solo nas profundidades de (0-15; 15-30 e 30-50 cm) não apresentaram interação significativa nos fatores máquinas e condição de tráfego, porém os efeitos acarretados pelo tráfego de ambas as máquinas só foram evidenciados quando comparados com a condição sem tráfego (testemunha).

3.3.2.7. Intensidade de tráfego

O intenso tráfego das máquinas vem sendo considerado o principal responsável pelo aumento da resistência mecânica à penetração de raízes e da densidade do solo, além de diminuir a porosidade e condutividade hidráulica do solo, com consequente aumento da compactação. Tal situação dificulta a saída de água e o crescimento das plantas, afetando consideravelmente a produção da cultura, além de intervir na qualidade ambiental devido à susceptibilidade ao processo erosivo (HAMZA; ANDERSON, 2005; DEDECEK; GAVA, 2005).

A intensidade de tráfego se refere ao número de passadas das máquinas de colheita da madeira dentro do talhão, sendo considerado um agente que causa a compactação do solo. Para Soane (1980), cada solo apresenta uma reação diferenciada em relação à duração da pressão aplicada sobre a sua superfície, ocasionada pelo tráfego das máquinas, porém as primeiras passadas das máquinas são as responsáveis por ocasionarem os maiores distúrbios ao solo.

De acordo com Dias Júnior (2000), a intensidade de passadas das máquinas é um dos fatores que determina o nível da compactação em profundidade, que pode ser explicado devido às máquinas trafegarem várias vezes em uma única linha durante a colheita da madeira, ocasionando a compactação do solo, além de facilitar o processo erosivo.

Seixas e Souza (2007) estudando o efeito da compactação em função da frequência de tráfego, concluíram que a maior parte da compactação do solo ocorreu durante as primeiras passadas da máquina. Além disso, constataram que em torno de 80% do aumento da densidade do solo, ocorrido após 20 passadas do trator agrícola acoplado a uma carreta carregada de madeira com peso de 8 t, eram resultantes das cinco primeiras passadas do trator, não ocorrendo incremento significativo ao tráfego subsequente.

Sampietro e Lopes (2011) enfatizaram que o aumento da intensidade de tráfego dos tratores florestais *feller buncher* e *skidder* ocasionaram incrementos na resistência mecânica à penetração e na densidade, tanto para o Cambissolo quanto para o Neossolo. Os autores também observaram que as camadas superficiais do solo foram mais suscetíveis à compactação ocasionada pelo aumento das passadas das máquinas.

Pezzoni Filho et al. (2014) notaram que o número crescente de passadas do trator *skidder*, em um Cambissolo Háplico, aumentou a densidade do solo até a quinta passada em 15,2% quando comparado com a condição sem tráfego, apresentando valores que variaram entre 1,36 Mg m⁻³ a 1,17 Mg m⁻³, respectivamente.

Neste sentido, indica-se que o número de passadas das máquinas dentro do talhão deve se restringir a menor área possível, de modo a contribuir com a redução da compactação, principalmente em situação de elevado teor de umidade do solo. Tal controle de tráfego é comum no sistema de colheita da madeira com o *forwarder*, em que o transporte da madeira é realizado de forma mais sistematizada, diferentemente do arraste de árvores feito pelo *skidder*, que ocorre de forma aleatória no interior do talhão (SEIXAS, 2002).

3.3.3. Efeito da compactação

Os danos ocasionados ao solo e os efeitos sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas devido à intensidade de tráfego das máquinas florestais, nem sempre são evidentes. Fenner (2014) relata que é de grande importância conseguir identificar o elo entre as deformações e as funções do solo para as plantas, já que não é possível prever as reações que irão acontecer no solo após o tráfego ou anteceder as consequências dessa reação para as plantas.

De acordo com Reichert et al. (2007), a compactação influencia na condutividade hidráulica e na infiltração de água no solo, podendo ocorrer devido à mudança no tamanho e na geometria dos espaços entre as partículas do solo. Silveira (2001) diz que os solos compactados prejudicam o desenvolvimento radicular das plantas, além de dificultar a mobilidade dos fertilizantes nas camadas do solo e reduzir a infiltração de água e das trocas gasosas entre a atmosfera e o solo.

Para Seixas (2002), a consequência da compactação do solo está diretamente ligada com o desenvolvimento do sistema radicular das árvores. Sendo assim, a expansão das raízes na busca por nutrientes e água pode se tornar prejudicada, tendo como consequência a redução do

crescimento da parte aérea da planta, em decorrência da dificuldade das raízes a ultrapassar a resistência à penetração do solo resultante do processo de compactação.

O impedimento no desenvolvimento da raiz principal em um solo compactado faz com o que as plantas criem seus próprios mecanismos de defesa, aumentando o diâmetro das raízes laterais com tamanho suficiente para penetrar nos poros. Portanto, como as raízes laterais tendem a se comportar de forma semelhante às raízes principais em um solo compactado, quando ocorre algum obstáculo para o seu crescimento, o sistema radicular tende a ficar atrofiado e inteiramente coberto por pelos radiculares (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Vários autores retratam que a compactação exerce efeitos negativos sobre as características do solo e no desenvolvimento das plantas. De um modo geral, o tráfego das máquinas e a pressão que é aplicada sobre a superfície do solo ocasionam deformações em sua estrutura, podendo causar movimentação das partículas no solo, ocasionando deformações em sua estrutura física e química e também no crescimento das plantas (SILVEIRA, 2001).

3.4. Atributos físicos do solo

3.4.1. Densidade do solo

A densidade é considerada uma das propriedades físicas mais utilizadas na avaliação da compactação do solo, sendo considerada uma das mais seguras por apresentar pouca dependência com outros fatores, como a umidade (REICHERT et al., 2007).

É definida como sendo o quociente da massa de sólidos por volume, podendo ser afetada por cultivos que alteram a sua estrutura e, também, pelo arranjo e volume dos poros. Essas modificações afetam as propriedades físico-hídricas do solo, como a porosidade, aeração, retenção de água no solo, disponibilidade de água para as plantas e resistência do solo à penetração (KLEIN, 2014).

A relação entre a massa de solo seco em estufa (M_{ss}), expressa em (kg ou Mg) e seu respectivo volume total (V), expresso em (dm^3), isto é, volume do solo incluindo os espaços porosos ocupados pela água (V_a) e pelo ar (V_{ar}) é denominada densidade do solo (D_s), expressa em ($kg\ dm^{-3}$ ou $Mg\ m^{-3}$). A densidade do solo é denominada como indicador da qualidade física de um solo e é vastamente utilizada para determinação de outras propriedades do mesmo (REINERT et al., 2006).

As alterações nos valores da densidade do solo podem ser originadas por ações artificiais, devido às forças mecânicas originadas da pressão ocasionada pelas passadas das máquinas e seus implementos ou por causas naturais de difícil avaliação, como a eluviação de argilas (SECCO et al., 2004).

De acordo como Letey (1985), a densidade do solo é uma das variáveis do solo que afeta indiretamente o crescimento das plantas. Sendo assim, o valor de densidade crítica a partir da qual as raízes das plantas têm dificuldade ou não conseguem se desenvolver, irá variar de acordo com a textura do solo. Para Reichert et al. (2003), a densidade crítica para solos com textura franco-arenosa varia entre 1,70 a 1,80 Mg m⁻³, enquanto para solos franco-argilosos essa variação fica entre 1,40 a 1,50 Mg m⁻³. Já Reynolds et al. (2007) retrata uma maior variação da densidade para solos com textura argilosa 0,90 a 1,20 Mg m⁻³.

3.4.2. Porosidade do solo

De acordo com Prevedello (1996), o solo é considerado um sistema trifásico, composto pelas fases sólida, líquida e gasosa, sendo que as duas últimas compõe o sistema poroso do solo. De acordo com o mesmo autor, os poros são cavidades de tamanhos diferentes, que podem ser determinados pelo arranjo, forma e tamanho das partículas do solo.

A porosidade é uma fração volumétrica do solo que pode estar ocupada com água e/ou ar, representando o local onde circulam a solução (água e nutrientes) e o ar, ou seja, é o espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1970).

Segundo Mozart (2010), a porosidade do solo pode ser classificada como macroporosidade e microporosidade. Os macroporos são responsáveis por promover a infiltração e a rápida redistribuição de água no solo e ainda conduzir os gases ali existentes, enquanto os microporos são importantes no armazenamento e retenção de água do solo.

A porosidade é considerada um atributo dependente da quantidade de matéria orgânica presente no solo. Sendo assim, o acúmulo de matéria orgânica pode ser relacionado com a minimização da densidade do solo, devido à porosidade aumentar e reduzir os pontos de contato com as partículas sólidas do solo (BRAIDA et al., 2011). Azevedo e Dalmolin (2003) relatam que a porosidade tende a diminuir com a profundidade do solo, pois à medida que o teor de matéria orgânica decresce conforme os horizontes do solo, nota-se um maior grau de

empacotamento das partículas, fazendo com o que a porosidade total diminua com o aumento da profundidade.

A compactação do solo ocorre devido à diminuição dos poros do solo com aumento de sua densidade. Em geral, os macroporos são os mais afetados, pois têm a função de realizar o fluxo de ar e água e é por onde as raízes crescem com maior facilidade (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

3.4.3. Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é considerada um indicador de compactação no solo, sendo que este parâmetro descreve a resistência física que o solo apresenta quando algo tenta se mover através dele, como por exemplo, as raízes em fase de crescimento. A RP influencia diretamente no desenvolvimento das raízes e da parte aérea das plantas, sendo que o crescimento das mesmas e a produtividade das culturas se comportam de maneira inversamente proporcional ao valor da RP (LIMA et al., 2010).

Segundo Canarache (1990), a RP é um parâmetro físico do solo que é dependente da densidade, umidade e distribuição do tamanho de partículas. Silva (2003) relata que um solo mais denso ou seco tende a apresentar uma maior resistência à penetração quando comparado com um solo menos denso ou mais úmido, do mesmo modo que, para uma mesma condição de umidade, um solo argiloso apresenta maior RP em relação ao solo arenoso.

De acordo com Taylor et al. (1966), os níveis críticos de resistência mecânica a penetração para o desenvolvimento das plantas variam de acordo com o tipo de solo e a espécie cultivada. Reichert et al. (2007), relatam que geralmente os valores críticos da RP variam entre 1,5 a 3,0 MPa. Já Zou et al. (2000) encontraram que o nível limitante para o desenvolvimento das raízes de espécies florestais foi de 3,0 MPa.

A compactação do solo dificulta o desenvolvimento radicular, sendo que as raízes tendem a crescer em outras direções àquela camada compactada. Resultados semelhantes foram observados por Collares et al. (2008), que em condições de compactação adicional, a RP dificultou o desenvolvimento das raízes na camada superficial do solo (0-10 cm), apresentando fortes indícios de má formação e desenvolvimento de raízes secundárias.

A determinação da resistência mecânica do solo à penetração é uma variável de grande importância para a avaliação da compactação do solo, podendo ser utilizada como método de

manejo e de controle da qualidade física do solo. Portanto, a determinação e o monitoramento da RP se tornam ferramentas importantes para caracterizar a área de cultivo, além de servir de subsídio para o planejamento de práticas culturais empregadas na propriedade rural (SANTOS et al., 2005a).

Para Seixas (2002), as desvantagens de se utilizar a RP como um parâmetro determinante da compactação é que a presença de raízes, pedras, umidade do solo tendem a acarretar divergências nos resultados das leituras da resistência á penetração.

3.4.4. Ensaio de Proctor normal

A susceptibilidade à compactação do solo pode ser analisada utilizando o ensaio de Proctor normal. Esse teste foi criado pelo Engenheiro Civil Ralf Proctor, com o intuito de se determinar a densidade máxima do solo para uma umidade ótima ou umidade crítica, onde ocorre a máxima compactação (VARGAS, 1977).

Neste ensaio, para uma mesma energia de compactação, a densidade do solo obtida é totalmente dependente da umidade, ou seja, a densidade tende a aumentar conforme o acréscimo de umidade até um determinado valor, sendo que após, a mesma se torna decrescente. Quando o solo é compactado por diferentes teores de água e relacionado com os valores de densidade, obtém-se a curva de compactação do solo, sendo possível calcular a densidade máxima e a umidade ótima para a compactação (BRAIDA et al., 2006).

De acordo com Bueno e Villar (1988) e Pinto (2006), o processo de compactação pode ser explicado devido à influência que a água exerce sobre as partículas do solo. Quando o solo está com umidade baixa, a água presente nos seus poros tende a ficar retida por forças de absorção e de capilaridade. Com isso, a tensão da água faz com que o solo se una devido ao fenômeno de coesão, impedindo a sua desagregação e deslocamento das partículas para que formem um novo rearranjo possibilitando a redução da porosidade, ocorrendo na parte seca da curva de compactação. À medida que aumenta a quantidade de água ocorre a lubrificação das partículas, formando um arranjo mais compacto, chegando um ponto em que a compactação não é capaz de expulsar o ar dos poros e a presença de água livre que consome parte da energia aplicada dificulta o processo de compactação.

De acordo com Seixas (2002), um método usual utilizado para minimizar a compactação do solo é reduzir as operações das máquinas de acordo com as condições de umidade e textura

do solo, que envolve a interpretação do teste de Proctor, por meio da umidade crítica do solo para se obter a sua densidade máxima. Além disso, Klein (2014) relata que as grandes vantagens de se utilizar essa metodologia são os baixos custos dos equipamentos, rapidez e a simplicidade da sua realização.

3.4.5. Formação de sulcos no solo

A formação de sulco ou aprofundamento do trilho é definida como a diferença do nível da superfície do solo antes e após o tráfego das máquinas, observado na base do rastro. Isso acontece porque o solo recebe diferentes pressões externas ocasionadas pelas passagens das máquinas, fazendo que ocorra um rearranjo das partículas do solo (FENNER, 2014).

Para Mialhe (1993), recalque “sinônimo de sulco ou rastro” é uma definição técnica com base no conceito da mecânica do solo, que é denominado como rebaixamento do leito de rolamento pelos rodados, que tem como consequência a redução do volume de macroporos, gerando a expulsão de água e ar neles existentes.

A redução do volume dos poros acarretada pelo tráfego das máquinas é semelhante à diminuição ocasionada pela formação de sulcos mais largos, resultando em uma compactação mais superficial quando comparado com a formação de sulcos mais estreitos (CHANCELLOR, 1977).

E para que ocorra um equilíbrio durante o tráfego, as forças exercidas pela capacidade de suporte de carga e pela pressão externa devem apresentar intensidades iguais. Sendo assim, quando a pressão externa for maior, acontecerá o aprofundamento do sulco até que haja um equilíbrio estabelecido entre as forças (FENNER, 2014).

De acordo com Couto (2012), rodados com a mesma largura podem formar sulcos com diferentes profundidades ao possuírem pressões diferentes, ou seja, pressões de inflagem maiores tendem a formar sulcos mais profundos. Por isso, a utilização de máquinas mais leves, com rodados mais largos e com pressão adequada são práticas que devem ser adotadas visando à redução da compactação do solo.

3.5. Medidas mitigadoras da compactação do solo

Existem várias maneiras de se prevenir e diminuir os efeitos causados pela compactação originada do tráfego das máquinas de colheita da madeira, conforme as sugeridas por Fenner (2014). Como exemplo, cita-se: redução da pressão que as máquinas exercem sobre o solo de modo a transportar menor quantidade de carga; aumento do número de rodados da máquina; aumento da largura dos pneus; e uso de um sistema de suspensão adequado para reduzir a capacidade de compactação das máquinas.

Além disso, uma alternativa para amenizar os efeitos da compactação é o revolvimento parcial do solo, que pode ser realizado por meio da escarificação ou subsolagem. Esses métodos são amplamente utilizados, pois aumentam a porosidade e a rugosidade superficial, beneficiando a infiltração da água no solo (TORMENA et al., 2002; ROSA et al., 2008).

Reichert et al. (2007) relatam que a subsolagem do solo é uma maneira eficiente e rápida de se romper as camadas compactadas, todavia, é necessário que o processo seja feito com atenção, levando em consideração a umidade do solo no momento da subsolagem, profundidade de atuação do implemento e espaçamento entre as hastes. Além disso, deve-se averiguar a necessidade de tal operação, pois existem gastos financeiros e alta potência do trator, bem como da destruição da estrutura do solo, pois o mesmo fica semidescoberto, sujeito ao impacto das gotas de chuva, podendo causar a erosão ao solo.

A recuperação natural do solo compactado é um processo demorado e dependente das condições climáticas do local. Por isso, o preparo do solo em muitos casos é considerado fundamental quando é realizado com propósito de se aumentar a capacidade produtiva do sítio. Em contrapartida, o preparo do solo é uma operação onerosa, e às vezes, o intenso revolvimento do solo pode facilitar a ocorrência de processos erosivos. Por esse motivo, torna-se interessante que a colheita da madeira cause o menor dano possível às propriedades físicas do solo, sem que prejudique a produtividade do sítio, a fim de se evitar o posterior preparo do solo (SEIXAS, 2002).

Por fim, um dos aspectos mais importantes a ser considerado é o planejamento das operações florestais, buscando a melhor combinação de um complexo conjunto de fatores. De acordo com as possíveis soluções, a concentração de tráfego é uma delas, com o intuito de se diminuir a área compactada, devendo definir modelos de tráfego adequados para cada situação, de modo a concentrar os danos em menor área por meio da redução do número de passadas, bem como do tráfego controlado (FENNER, 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

Esta pesquisa foi conduzida nas áreas operacionais de colheita da madeira pertencentes à empresa Santa Maria Cia. de Papel e Celulose, localizada no município de Campina do Simão, Estado do Paraná, nas coordenadas geográficas 25° 10' 26'' S e 51° 45' 41'' W (Figura 1).

O clima da região, segundo Köppen, é classificado como temperado (Cfb), caracterizado por não possuir estação seca, com temperatura média em meses mais frios abaixo de 18 °C e, em meses mais quentes abaixo de 22 °C. A precipitação média anual varia entre 1.800 a 2.000 mm, com chuvas bem distribuídas nos diferentes meses do ano e, altitude média de 1.100 m em relação ao nível do mar (IAPAR, 2000).

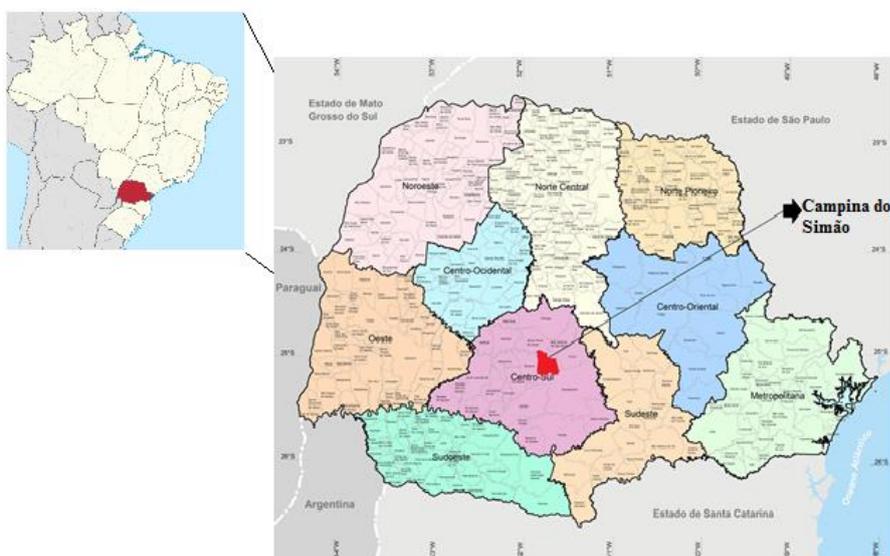


Figura 1. Localização do município de Campina do Simão – PR.

Fonte: Adaptado - IPARDES (2015).

As características do povoamento estudado são descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Características do povoamento de *Pinus taeda* L. estudado.

Item	Especificação
Ocupação do solo anterior	Agricultura
Preparo do solo	Não realizado
Espécie	<i>Pinus taeda</i> L.
Idade de corte (anos)	12
Espaçamento (m)	2,5 x 2,5
Número de árvores/ha (nº/ha)	1.600
Área do talhão estudado (ha)	36,01
DAP médio (cm)	23,53
Altura média (m)	18,41
Área basal (m ² /ha)	48,50
Volume médio individual (m ³)	0,37
Volume médio/ha (m ³ /ha)	377,73

Para a classificação do solo da área de estudo foi aberta uma trincheira até a profundidade de 180 cm (Figura 2), com o auxílio de uma retroescavadeira nas proximidades onde foram instalados os blocos do experimento.

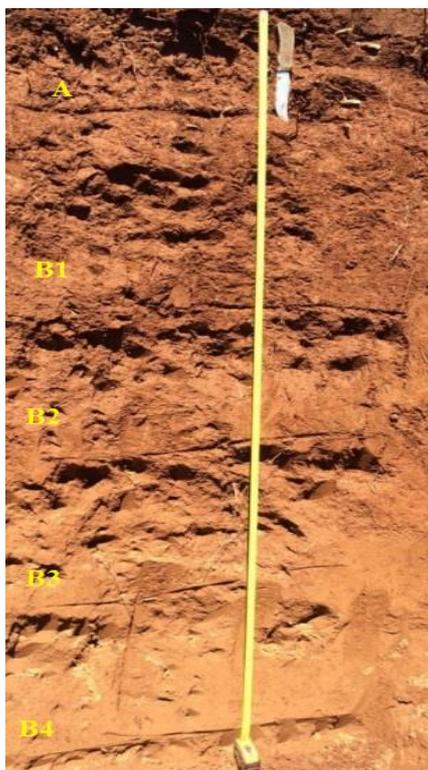


Figura 2. Perfil do solo localizado na Fazenda Serro Verde (Campina do Simão – PR).

Em que: A: Horizonte A; B1: Horizonte B1; B2: Horizonte B2; B3: Horizonte B3; B4: Horizonte B4; B5: Horizonte B5.

Foram então coletadas seis amostras deformadas de solo para a determinação da granulometria, matéria orgânica e teor de carbono orgânico nas profundidades de 0-22, 22-67, 67-100, 100-135, 135-171, 171-180 cm, correspondente aos horizontes do perfil do solo.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, de acordo com o manual de análises físicas do solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1997), enquanto os teores de carbono orgânico (Corg) foram determinados pelo método de Walkley-Black (RAIJ et al., 2001). As análises foram realizadas nos Laboratórios de Solos e Nutrição de Plantas e de Solos Florestais ambos pertencentes à Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Os resultados das análises citadas acima estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Análise granulométrica, teor carbono orgânico e textura do perfil do solo.

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia			Argila	Corg (g dm ⁻³)	Textura
		Grossa	Fina	Silte			
A	0-22	62	54	163	720	17,66	M. Argilosa
B1	22-67	55	40	204	700	10,03	M. Argilosa
B2	67-100	111	67	262	560	7,87	Argilosa
B3	100-135	246	121	313	320	3,27	F. Argilosa
B4	135-171	263	196	240	300	1,35	F. Argilosa
B5	171-180	214	157	328	300	1,67	F. Argilosa

Corg: Carbono orgânico; M.. Argilosa: Muito Argilosa; F. Argilosa: Franco Argilosa

Utilizando o livro do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (2013), o solo da área de estudo foi classificado como Nitossolo Bruno, característico por apresentar horizonte B nítico.

4.2. Sistema de colheita da madeira

O sistema de colheita da madeira utilizado pela empresa é de árvores inteiras (*full tree*), caracterizado pelas operações de corte, arraste e processamento da madeira na margem do talhão. O procedimento de corte composto pela derrubada e empilhamento das árvores em feixes foi realizado pelo trator florestal *feller direcional* (FD), da marca Caterpillar 320D FM, potência de 157 HP, rodados de esteiras, cabeçote Satco 420 e peso operacional de 26,9 t (Figura 3). A

máquina realizou o corte e o empilhamento das árvores de quatro áreas de 450 m², correspondente aos blocos instalados no campo.

O arraste dos feixes de árvores foi realizado pelo trator florestal *skidder* (SK), marca Caterpillar 545, equipado com rodados de pneus, tração 4x4, com potência de 219 HP e peso operacional de 19,19 t (Figura 4). A máquina realizava o arraste dos feixes de árvores de dentro das parcelas, sendo que cada feixe possuía em média 17 árvores, equivalente a 6,30 m³.

Por fim, o processamento das árvores foi executado nas margens dos talhões pelo trator florestal *harvester* da marca Caterpillar 320D FM, com potência de 157 HP, rodados de esteira, equipado com cabeçote 7000C e peso operacional de 27,12 t (Figura 5).



Figura 3. Trator florestal *feller direcional*.



Figura 4. Trator florestal *skidder*.



Figura 5. Trator florestal *harvester*.

4.3. Procedimento amostral

O procedimento de amostragem do solo foi realizado por meio da instalação de quatro blocos (30 m de comprimento e 15 m de largura), distribuídos de forma aleatória no interior do talhão, porém, alocados nas linhas de tráfego das máquinas de corte e extração. Os blocos foram distribuídos em áreas próximas às estradas e no interior do talhão, mantendo-se as mesmas condições de relevo, com a finalidade de diminuir a variabilidade natural do solo.

Foram estudadas diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*, cujas máquinas trafegavam no interior do talhão. O tráfego do *harvester* não foi considerado neste estudo, devido à máquina trafegar somente nas margens dos talhões. Foram realizadas simulações de tráfego das máquinas de colheita da madeira com o mesmo volume de madeira (6,30 m³), que foram denominados os tratamentos deste estudo.

Foram avaliados os seguintes tratamentos:

- Sem tráfego de máquinas com a floresta em pé (Testemunha - ST);
- 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK);
- 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK);
- 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK);
- 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK);

Em relação ao número de passadas das máquinas, pode-se dizer que foram adotadas medidas semelhantes às condições reais de tráfego em uma floresta plantada, em que o *feller direcional*, que é designado para realizar o corte das árvores e organizá-las em feixes, tende a trafegar somente uma única vez na área de corte, seguindo as linhas das árvores. Posteriormente, o trator florestal arrasador *skidder* trafegava vazio sobre a área de corte na busca da carga de madeira, voltando carregado com os feixes de árvores organizados no interior do talhão.

Neste estudo, uma passada do *skidder* foi considerada o somatório de uma passada vazia e uma carregada, correspondendo ao ciclo da máquina. Portanto, 1 passada do FD + 2 passadas do SK correspondeu a uma passada do *feller direcional* e quatro passadas do *skidder*, sendo duas vezes vazio e duas carregadas, e assim sucessivamente.

Em cada bloco foram coletadas amostras não deformadas de solo em quatro pontos amostrais equidistantes entre si, concentrados nas linhas dos rodados das máquinas e nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm, como ilustrado na Figura 6, em que a umidade volumétrica média do solo no momento do tráfego das máquinas era de 0,44 kg kg⁻¹. Foram coletados um total de 304 amostras, sendo 256 amostras direcionadas para as quatro intensidades de tráfego x quatro pontos amostrais equidistantes x quatro profundidades x quatro blocos, e 48 amostras para o tratamento testemunha, sendo um tratamento x três pontos amostrais equidistantes x quatro profundidades x quatro blocos.

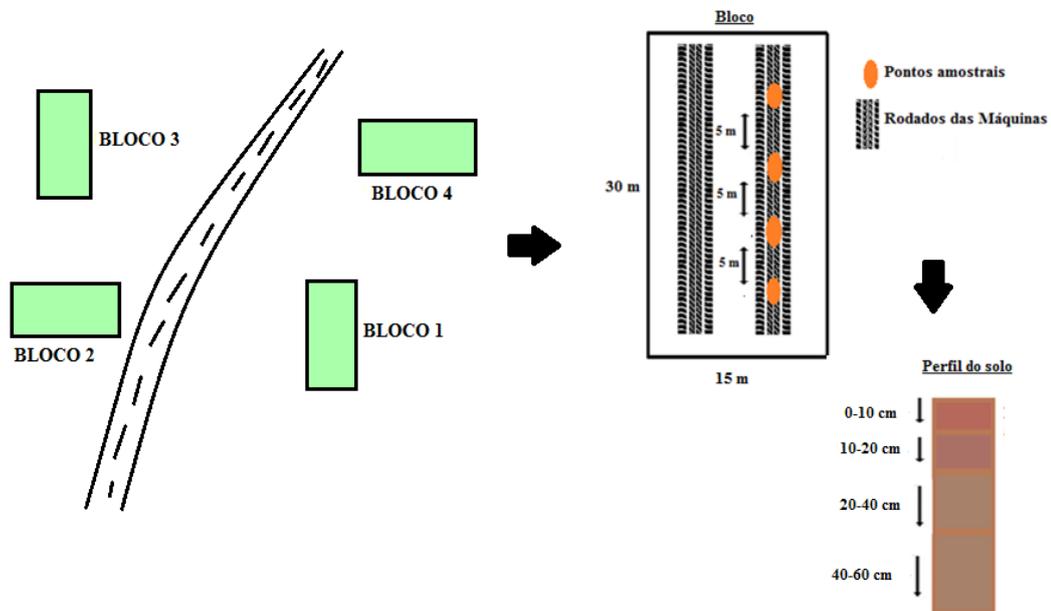


Figura 6. Esquema amostral ilustrando o procedimento de instalação dos blocos a campo e as profundidades de coleta das amostras não deformadas de solo.

4.4. Avaliação dos atributos físicos do solo

4.4.1. Análise granulométrica

Para a determinação da análise granulométrica foram coletadas amostras compostas de solo com estrutura deformada, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, com o auxílio de um trado holandês em todos os blocos estudados.

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta, baseando-se na velocidade de queda das partículas, em que foi fixado um tempo para o deslocamento vertical das partículas em solução do solo com água e hidróxido de sódio. Em seguida foi pipetado 5 mL da solução, para a determinação da argila que foi seca em estufa a 65 °C por algumas horas e pesadas, as frações de areia grossa e fina foram separadas em peneira de 212 e 53 μm respectivamente, secas em estufa e pesadas, enquanto o silte foi obtido por diferença de valores de argila e areia.

4.4.2. Formação de sulcos no solo

A ocorrência de formação de sulcos no solo causados pelos rodados do *feller direcional* e do *skidder* foi avaliada após a ocorrência do tráfego das máquinas. Os sulcos foram medidos por pontos de elevação nos rastros deixados pelos rodados das máquinas em quatro pontos amostrais dentro dos blocos, com uma distância de 5 metros entre si, conforme a metodologia proposta por Nugent et al. (2003).

Para a determinação da largura do sulco foram utilizadas duas hastes de madeira instaladas nas extremidades do sulco, que serviram de suporte para amarrar uma corda, possibilitando o nivelamento dos pontos de coleta. Em seguida, com o auxílio de uma fita métrica foi possível obter a largura e a profundidade do sulco (Figura 7).

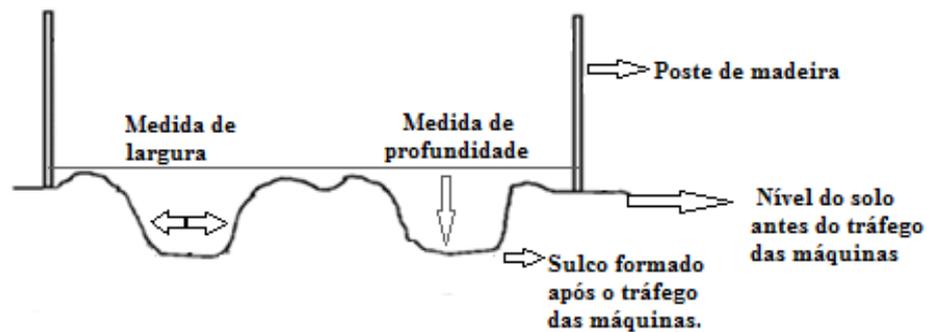


Figura 7. Amostragem de como foi medido a formação de sulcos.

4.4.3. Pressão estática exercida pelas máquinas no solo

A pressão de cada máquina sobre o solo foi calculada utilizando a medida da área de contato dos rodados com o solo. Os rodados de esteira do *feller direcional* foram demarcados com auxílio de cal (Figura 8A) e, após a saída da máquina, com o auxílio de uma fita métrica foi possível realizar a medida da área ocupada pelos rodados demarcados com cal.

Para a determinação da área de contato dos pneus do trator *skidder* com o solo foi utilizada uma fita métrica para medir a largura e diâmetro do pneu (Figura 8B), sendo que com

tais valores foi possível calcular a área de contato entre pneu e o solo de acordo com a equação abaixo, proposta por McKYES (1985).



Figura 8. Rodados de esteira do *feller direcional* demarcados com cal (A) e medição do diâmetro do pneu do *skidder* utilizando fita métrica (B).

Para determinação da área de contato do rodado de pneu com o solo foi utilizada a equação abaixo, onde a constante do solo “X” adotada foi o valor de número 4, sendo que solo da área de pesquisa era classificado como Nitossolo Bruno de textura argilosa, se apresentando como condição firme.

$$A = \frac{(b \cdot D)}{X}$$

Onde: A = área de contato pneu/solo (m²); b = largura do pneu (m); D = diâmetro externo do pneu (m) e X = constante do solo (2 para solo solto e 4 para solo firme).

A pressão de contato dos rodados do *feller direcional* e do *skidder* foi determinada por meio da equação abaixo. A distribuição do peso total do trator *skidder* (sem carga) foi definida em 65% para o eixo dianteiro e 35% o eixo traseiro, sendo que, segundo informações do fabricante a distribuição obedece tal relação. Para o *feller direcional* não existe essa relação, pois

os seus rodados são de esteira que distribui uniformemente o peso da máquina sobre o solo. A pressão de contato do rodado e solo foi obtida pela expressão abaixo:

$$P_c = \frac{P}{A}$$

Onde: P_c = pressão de contato rodado/solo (kPa); P = peso de contato do rodado/solo (kN) e A = área de contato rodado/solo (m²).

Os valores de área e de pressão de contato entre esteira/pneu/solo das máquinas florestais estudadas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Área e pressão estática de contato entre esteira/pneu/solo do *feller direcional* e *skidder* sem carga.

<i>Feller Direcional</i>		
	Esteira esquerda	Esteira direita
Área (m²)	1,62	1,63
Pressão (kPa)	162	162
<i>Skidder</i>		
	Pneus dianteiros	Pneus traseiros
Área (m²)	2,30	2,28
Pressão (kPa)	326	329
Pressão de inflagem (lb)	40	40

4.4.4. Densidade do solo

Para determinação da densidade foram coletadas amostras não deformadas de solo, com auxílio de uma cavadeira, marreta e trado de amostras indeformadas (TAI), da marca Sonda Terra (Figura 9A). Foram utilizados anéis volumétricos de 95 cm³, que foram cravados no solo no centro das profundidades de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm até o seu preenchimento total (Figura 9B). Posteriormente, em laboratório, o excesso de solo foi removido até se igualar às bordas dos anéis.



Figura 9. Trado de amostras indeformadas (TAI) (A) e anel volumétrico preenchido com solo (B).

A densidade do solo foi determinada pela relação entre massa de solo seco (M_{ss}) em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e o volume do anel volumétrico, conforme a metodologia proposta por Blake e Hartge (1986), utilizando a expressão:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V}$$

Onde: D_s = densidade do solo ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$); M_{ss} = massa do solo seco a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mg); e V = volume de solo contido no anel (m^{-3}).

4.4.5. Porosidade total, microporosidade e macroporosidade

Para a determinação da porosidade total (PT), microporosidade (MI) e macroporosidade (MA), as amostras não deformadas de solo foram protegidas na parte inferior do cilindro, por um disco de pano permeável (vual), sendo então transportadas para uma bandeja com água, onde ficaram por alguns dias até estarem totalmente saturadas (Figura 10).



Figura 10. Anéis volumétricos em processo de saturação.

Após a saturação, as amostras foram retiradas da água e pesadas (P_1), em seguida foram transferidas para a mesa de tensão com o potencial correspondente a 60 cm de coluna d'água, onde permaneceram por 48 horas. Por fim, as amostras foram novamente submetidas à pesagem (P_2) e posteriormente colocadas em estufa a 105°C, onde permaneceram por 48 horas e foram novamente pesadas (P_3). Com os pesos obtidos e os valores de densidade do solo, foi possível realizar os cálculos de porosidade total, microporosidade e macroporosidade, por meio das seguintes expressões:

$$PT = \frac{M_{ssa} - M_{ss}}{M_{ss}} \times D_s$$

$$MI = \frac{M_{st} - M_{ss}}{M_{ss}} \times D_s$$

$$MA = PT - MI$$

Onde: PT = Porosidade total ($m^{-3}m^{-3}$); M_{ssa} = massa do solo saturado com água (g); M_{ss} = massa do solo seco em estufa a 105°C (g); D_s = Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); MI = Microporosidade ($m^{-3}m^{-3}$); M_{st} = massa do solo após ser submetida à tensão de 60 cm de coluna d'água (g); M_{ss} = massa do solo seco em estufa a 105°C (g); D_s = Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); MA = Macroporosidade ($m^{-3}m^{-3}$).

É importante ressaltar que os anéis volumétricos foram saturados e colocados sobre a mesa de tensão antes de serem levados a estufa (105°C) para determinação da M_{ss} , pois para

realização dos cálculos de PT, MI e MA, foi preciso utilizar os valores de D_s , por esse motivo a sua metodologia foi citada primeiro.

4.4.6. Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico digital, da marca *Eijkelkamp* e modelo 06.15.SA (Figura 11), equipado com ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm^2 (11,28 mm de diâmetro nominal) e velocidade de penetração máxima de 2 cm s^{-1} obtendo diretamente os valores da RP em Mega Pascal (MPa).

As leituras da RP foram realizadas em quatro pontos amostrais equidistantes entre si (5 metros) até a profundidade de 40 cm em cada bloco, sendo que as medidas de RP foram realizadas de acordo com os tratamentos estudados, totalizando 20 leituras por bloco. Não foi possível realizar a RP em profundidades superiores a 40 cm, devido à dureza, rigidez e textura argilosa do solo.



Figura 11. Medição da resistência mecânica à penetração com uso do penetrômetro digital.

A umidade gravimétrica (U_g) do solo foi determinada conforme a metodologia da EMBRAPA (1997), por meio de coletas de amostras deformadas utilizando um trado holandês em todos os pontos de leitura da RP, nas camadas de 0-10; 10-20 e 20-40 cm de profundidade.

Com os valores de U_g e D_s , foi possível calcular os teores de água volumétrica do solo (U_v), que foram utilizados para ilustrar as condições de umidade do solo no momento das leituras de RP.

4.4.7. Ensaio de Proctor normal

Para a realização do ensaio de Proctor normal foram coletadas quatro amostras compostas de solo, referentes ao número de blocos e as profundidades estudadas. As amostras foram destorroadas e transferidas para uma casa de vegetação onde permaneceram por um período de sete dias e foram secas ao ar, em seguida, as amostras foram homogeneizadas e peneiradas em malha 4 mm.

Para a obtenção da curva de compactação em função da umidade do solo, as amostras deformadas foram compactadas com índices de umidade crescentes. A compactação das amostras foi realizada em três camadas, que receberam 26 golpes do soquete compactador de Proctor (Figura 12), determinando-se, logo após, a densidade do solo. Em cada amostra compactada, uma pequena quantidade de solo foi coletada para a determinação da umidade gravimétrica (KLEIN, 2014).

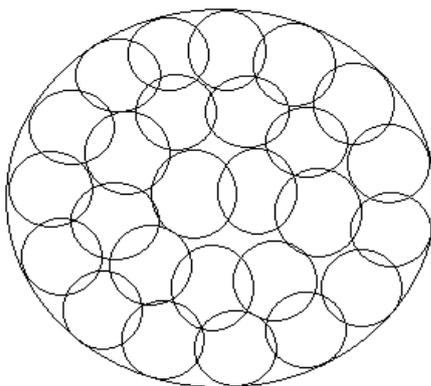


Figura 12. Forma de como foram realizados os 26 golpes nas amostras, com o soquete compactador de Proctor, para construção da cada camada compactada.

Com os valores da densidade e umidade gravimétrica do solo foram ajustados os gráficos de acordo com a quantidade de pontos determinados em laboratório, gerando uma equação polinomial, sendo que cada ponto do gráfico corresponde a uma amostra compactada.

De acordo com Iezzi et al. (1978), com a equação da curva gerada no gráfico foi possível determinar matematicamente a densidade máxima e a umidade ótima de compactação. Considerando a equação polinomial como $y = ax^2 + bx + c$, os valores da máxima densidade e da umidade gravimétrica ótima para a compactação serão obtidos através das seguintes equações:

$$Ug \text{ ótica} = \frac{-b}{2 \cdot a}$$

$$Ds \text{ máx} = (a * Ug \text{ ótica}^2 + b * Ug \text{ ótica}) + c$$

O grau de compactação de compactação do solo foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$GC = \frac{Ds \text{ APT}}{Ds \text{ máx}} \times 100$$

Onde: GC = Grau de compactação (%); Ds = Densidade do solo ($Mg \text{ m}^{-3}$); Ds máx: Densidade do solo máxima ($Mg \text{ m}^{-3}$).

4.5. Análise estatística

O procedimento estatístico utilizado foi o delineamento de blocos casualizados (DBC), sendo as repetições representadas pelo número de blocos existentes, ou seja, quatro blocos. Nas variáveis de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (MI) e macroporosidade (MA), as análises foram realizadas de acordo com cada intensidade de tráfego e as profundidades avaliadas no experimento, enquanto para a resistência à penetração (RP), embora as leituras tenham sido realizadas em um intervalo de 1 cm, as análises foram realizadas entre as profundidades de 0-10; 10-20 e 20-40 cm, conforme as coletas de solo para a umidade.

Os resultados de todas as variáveis avaliadas foram submetidos ao teste de Bartlett para a verificação da homogeneidade das variâncias e, posteriormente, foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Em seguida, após verificada a homogeneidade e normalidade das

variâncias, foi realizada a análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância, com auxílio do programa Assistat 7.7 beta.

Os gráficos do teste de Proctor normal foram realizados de acordo com as quatro camadas avaliadas no estudo, cujos resultados da densidade em função da umidade gravimétrica do solo foram ajustados no software Excel 2010, obtendo-se uma equação polinomial de segundo grau, possibilitando a realização dos cálculos de densidade máxima e umidade ótima para compactação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise granulométrica e teor de carbono orgânico

Na Tabela 4 são mostrados os valores médios da análise granulométrica, carbono orgânico e textura do solo estudado.

Tabela 4. Valores médios da análise granulométrica, teor de carbono orgânico e textura do Nitossolo Bruno nas profundidades estudadas.

Profundidade (cm)	Areia		Silte	Argila	Corg (g dm ⁻³)	Textura
	Grossa	Fina				
0-10	79	45	370	505	30,05	Argilosa
10-20	70	35	339	555	27,1	Argilosa
20-40	63	33	268	635	22,01	M. Argilosa
40-60	49	42	248	660	21,48	M. Argilosa

Corg: Carbono Orgânico; M. Argilosa: Muito Argilosa.

O solo da área estudada apresentou uma variação na quantidade do teor de argila de 505 a 660 g kg⁻¹, silte de 396 a 248 g kg⁻¹ e areia total (areia grossa + areia fina) de 125 a 92 g kg⁻¹. Como pode ser verificado, houve um incremento no teor de argila e redução no teor de silte e areia com o aumento da profundidade do solo.

O teor de carbono orgânico presente no solo foi decrescente como o aumento da profundidade, variando de 30,05 g dm⁻³ na camada de 0-10 cm a 21,48 g dm⁻³ na camada de 40-60 cm. Esse comportamento é considerado normal, devido a maior quantidade de resíduos orgânicos presentes nas camadas superficiais do solo e maior atividade biológica, que tende a diminuir com o aumento da profundidade.

Ao utilizar o triângulo de classes texturais do *Soil Survey Manual* dos Estados Unidos, presente no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo citado por Santos et al. (2005b), foi possível obter a textura das quatro camadas avaliadas no estudo, classificada como argilosa nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm e muito argilosa nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm, sendo tais camadas consideradas como muito argilosas por apresentarem um teor de argila acima de 60%.

5.2. Formação de sulcos no solo

Na Tabela 5 é apresentada a ocorrência de formação de sulcos no solo em profundidade (cm) e largura (cm) em função das diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira e da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) no momento do tráfego. É possível observar que, houve o aumento da profundidade e da largura do sulco em relação aos tratamentos avaliados, sendo que com o aumento da intensidade de tráfego das máquinas, maior se tornou a profundidade e a largura do sulco.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão (\pm) da umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), profundidade (cm) e largura (cm) de sulco do Nitossolo Bruno estudado após as diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Profundidade e largura dos sulcos		
	Umidade (kg kg^{-1})	Profundidade (cm)	Largura (cm)
1 FD + 1 SK	0,46 a ($\pm 0,07$)	9,89 d ($\pm 1,04$)	97,37 c ($\pm 12,69$)
1 FD + 2 SK	0,43 a ($\pm 0,05$)	12,42 c ($\pm 0,65$)	103,90 bc ($\pm 11,38$)
1 FD + 4 SK	0,46 a ($\pm 0,05$)	14,51 b ($\pm 1,07$)	116,25 ab ($\pm 14,52$)
1 FD + 8 SK	0,46 a ($\pm 0,05$)	16,03 a ($\pm 1,34$)	127,87 a ($\pm 16,90$)
MG	0,45	13,21	111,35
Valor F	3,64 ^{ns}	63,10 ^{**}	10,25 ^{**}
DMS	0,03	1,48	18,65
CV (%)	3,41	5,08	7,58

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %; 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; **significativo a 1 %; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Todos os tratamentos avaliados se diferenciaram estatisticamente em profundidade pelo teste Tukey, onde as intensidades de passadas de 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK apresentaram as maiores profundidades de sulco (14,51 e 16,03 cm), respectivamente. Tal fato pode ser explicado pela pouca quantidade de resíduos florestais sobre superfície do solo.

Nota-se que os valores de umidade gravimétrica descritos na Tabela 5 não se diferenciaram estatisticamente em relação às diferentes intensidades de tráfego, porém apresentaram valores de umidade que variaram entre (0,43 e 0,46 kg kg^{-1}), sendo superiores ao valor de umidade ótima, obtido pelo ensaio de Proctor normal (0,41 kg kg^{-1}) na camada de 0-10

cm. Portanto, pode ser afirmado que tais valores de umidade foram suficientes para causar a formação de sulcos no solo.

De acordo com a Tabela 5, verifica-se que houve efeito significativo do tráfego das máquinas em relação à largura dos sulcos. É possível observar que, conforme aumentou a intensidade de passadas das máquinas, maiores se tornaram a largura dos sulcos, apresentando variação entre 97,37 a 127,87 cm nos tratamentos 1 FD + 1 SK e 1 FD + 8 SK, correspondente a 23,8% de incremento na largura dos sulcos.

É importante ressaltar que, a simulação de tráfego foi uma metodologia adotada no estudo, bem como o ciclo operacional das máquinas. Sendo assim, para o tratamento 1 FD + 8 SK, foram totalizadas 17 passadas das máquinas sobre a linha de tráfego dos blocos, sendo 1 passada do *feller direcional*, 8 passadas do *skidder* sem carga (vazio) e 8 passadas do *skidder* com carga (feixe de árvores), que são as condições que realmente ocorrem no campo. Portanto, em relação ao aumento da largura dos sulcos, pode-se dizer que o operador do *skidder* sempre era orientado a trafegar sobre o mesmo rastro, porém a precisão das passadas nem sempre eram exatas, devido à existência de tocos de árvores, necessitando desviar a direção da máquina e contribuindo para o aumento da largura do rastro, e conseqüentemente, na formação do sulco.

As primeiras passadas das máquinas de colheita da madeira geralmente são as responsáveis pela maior parte da desestruturação das propriedades físicas do solo. Para evitar uma maior área de compactação no interior do talhão é indicado que as máquinas trafeguem sempre na mesma linha, metodologia adotada neste trabalho. Porém, esta concentração de passadas das máquinas aliada com os altos teores de água no solo, textura do solo, topografia e a falta de resíduos florestais sobre a superfície do terreno, contribuíram para a formação de sulcos no solo. Tal situação poderá então contribuir para a ocorrência de erosões, acarretando perdas de solo, além da queda de produtividade do sítio.

O controle do tráfego no momento que o solo apresentava altos teores água é considerado uma medida mitigadora e contribui para a não formação de sulcos no solo, pois no momento em que o solo encontra-se seco, este se torna bastante coeso apresentando maior resistência à deformação. Por outro lado, à medida que ocorre o aumento da umidade, há a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o rearranjo das partículas e diminuindo a resistência a deformação do solo.

5.3. Densidade do solo

Os valores médios de densidade do solo (Ds) nas situações sem tráfego e após o tráfego das máquinas de colheita da madeira em cada profundidade avaliada estão apresentados na Tabela 6. Como pode ser observado, houve um incremento da densidade do solo conforme ocorreu aumento nas intensidades de tráfego. Isso ocorreu devido ao rearranjo das partículas do solo, que quando expostas a diferentes pressões exercidas pelas máquinas tendem a se comprimir, resultando, conseqüentemente, no aumento da densidade do solo.

Tabela 6. Valores médios e desvio padrão (\pm) da densidade do solo (Mg m^{-3}) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Densidade do solo (Mg m^{-3})			
	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
Testemunha	1,00 b ($\pm 0,13$)	0,99 b ($\pm 0,10$)	1,07 a ($\pm 0,09$)	1,09 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 1 SK	1,11 ab ($\pm 0,06$)	1,09 ab ($\pm 0,08$)	1,09 a ($\pm 0,03$)	1,10 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 2 SK	1,14 a ($\pm 0,05$)	1,11 ab ($\pm 0,06$)	1,12 a ($\pm 0,04$)	1,09 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 4 SK	1,16 a ($\pm 0,04$)	1,12 a ($\pm 0,03$)	1,12 a ($\pm 0,04$)	1,11 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 8 SK	1,16 a ($\pm 0,07$)	1,15 a ($\pm 0,04$)	1,12 a ($\pm 0,02$)	1,12 a ($\pm 0,04$)
Média Geral	1,11	1,09	1,10	1,10
Valor F	5,59 **	5,06 *	2,13 ^{ns}	1,11 ^{ns}
DMS	0,12	0,12	0,07	0,05
CV (%)	4,86	4,99	3,16	2,05

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %; (Sem tráfego das máquinas de colheita da madeira (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; **significativo a 1 %; * significativo a 5%; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Na condição sem tráfego (Testemunha), as camadas superficiais do solo (0-10 e 10-20 cm) apresentaram uma densidade média variando entre 1,00 e 0,99 Mg m^{-3} , respectivamente, enquanto nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm, a Ds média variou entre 1,07 e 1,09 Mg m^{-3} . Esse comportamento também foi observado por Lopes et al. (2015), que afirmam que o aumento da densidade em relação à profundidade do solo é uma tendência natural, devido à maior quantidade de matéria orgânica presente nas camadas superficiais. Os autores também relatam

que menores valores de densidade presentes nas camadas superficiais também podem apresentar uma relação direta com a atividade biológica do solo (raízes, macro e micro fauna), além de ciclos de secagem e umedecimento, que são agentes que contribuem para minimizar a Ds.

Os tratamentos avaliados na camada de 0-10 cm se diferenciaram estatisticamente de acordo com o teste de Tukey. Foi possível observar que, conforme aumentou a intensidade de tráfego das máquinas de colheita da madeira, a Ds também aumentou, resultando em um incremento de 13,8% em relação à área não trafegada ($1,00 \text{ Mg m}^{-3}$) e entre as maiores intensidades de passadas das máquinas ($1,16 \text{ Mg m}^{-3}$). Tal comportamento também pode ser observado na profundidade de 10-20 cm, que apresentou um aumento gradativo de Ds em relação aos tratamentos estudados, onde o menor valor de densidade obtido foi de $0,99 \text{ Mg m}^{-3}$ (Testemunha) e o maior de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ (1 FD + 8 SK), contribuindo para um incremento de 13,9% na Ds.

Compactações superficiais do solo ocasionadas pela colheita de madeira também foram observadas por Sampietro e Lopes (2011), que avaliando o tráfego do *feller buncher* e *skidder* em um Cambissolo Húmico, obtiveram maiores valores de Ds na camada superficial do solo (0-15) nas maiores intensidades de tráfego, com incremento de 13,1% na intensidade de tráfego de FB + 15 SD (1 passada do *feller buncher* + 15 passadas do *skidder*), em relação à condição sem tráfego (ST).

Pezzoni Filho et al. (2014), trabalhando com a compactação de um Cambissolo causada pela extração florestal com trator *skidder*, relataram que o aumento da Ds até a quinta passada da máquina foi de 16,2% em relação à condição sem tráfego, com valores de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente.

De acordo com Reynolds et al. (2007), solos com textura argilosa devem apresentar uma variação na Ds entre $0,90$ a $1,20 \text{ Mg.m}^{-3}$, enquanto Kiehl (1979) relata que a densidade considerada ideal para solos argilosos assumem níveis entre $1,0$ a $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$. No entanto, os valores médios de Ds encontrados neste trabalho após o tráfego das máquinas de colheita da madeira não ultrapassaram $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, valor considerado crítico pelos pesquisadores citados, porém apresentaram resultados próximos a esse valor, podendo comprometer o desenvolvimento radicular da futura rotação da floresta de Pinus, já que a empresa estudada não realiza a subsolagem como atividade de preparo do solo antes do plantio.

As camadas de 20-40 e 40-60 cm não apresentaram diferenças significativas em relação aos tratamentos avaliados. Mesmo assim, foram observados incrementos de Ds, onde os maiores

valores na profundidade de 20-40 cm foram encontrados no 1 FD + 2 SK, 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK, resultando em um incremento de 4,5% em relação à testemunha. Já na camada de 40-60 cm esse incremento foi de apenas 2,7%, diferença encontrada entre 1,09 Mg m⁻³ (Testemunha) e 1,12 Mg m⁻³ (1 FD + 8 SK).

Apesar dos efeitos evidentes do tráfego das máquinas de colheita da madeira, em nenhuma das condições simuladas foram detectados incrementos de Ds acima de 15% em relação à condição sem tráfego (Testemunha), considerado como limitante proposto por Geist et al., (1989) e por Lacey e Ryan (2000), onde a compactação pode se tornar nociva ao crescimento radicular e ao desenvolvimento das plantas. Para Oliveira et al. (2001), pequenas alterações na Ds podem provocar graves consequências, como por exemplo, redução da porosidade do solo e do movimento de água e gases no perfil do solo.

Lopes et al. (2006b) avaliaram a compactação de um Latossolo submetido ao arraste de madeira, e concluíram que o trator florestal arrastador “*clambunk*” afetou a densidade do solo na camada superficial de 0-15 cm, em todas as condições de tráfego. Além disso, foram observados valores mais elevados de Ds em situações em que a máquina trafegou por uma e duas vezes carregada, sendo a densidade a propriedade física do solo mais afetada.

Por isso, é importante ressaltar, que as camadas superficiais do solo geralmente são as mais afetadas pela compactação, pois as mesmas ficam expostas às maiores pressões ocasionadas pelo tráfego das máquinas em comparação às camadas mais profundas. Tal fato ocorre principalmente quando o solo não se encontra coberto por resíduos florestais gerados pelo processamento da madeira na interior do talhão, situação comum no sistema de colheita de árvores inteiras, onde o processamento das árvores é realizado nas margens dos talhões.

5.4. Porosidade total

Na Tabela 7 é apresentado os valores médios de porosidade total (PT) do solo nos cinco tratamentos estudados. De modo geral, a PT não se diferenciou estatisticamente entre as condições sem e com tráfego das máquinas nas diferentes profundidades avaliadas. Apesar dos resultados obtidos não serem significativos, observa-se que a porosidade total decresceu conforme aumentou as intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira entre as profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm.

Tabela 7. Valores médios e desvio padrão (\pm) da porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
Testemunha	0,67 a ($\pm 0,04$)	0,66 a ($\pm 0,01$)	0,66 a ($\pm 0,01$)	0,67 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 1 SK	0,66 a ($\pm 0,01$)	0,67 a ($\pm 0,03$)	0,67 a ($\pm 0,01$)	0,67 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 2 SK	0,65 a ($\pm 0,03$)	0,66 a ($\pm 0,04$)	0,64 a ($\pm 0,05$)	0,66 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 4 SK	0,64 a ($\pm 0,03$)	0,66 a ($\pm 0,03$)	0,65 a ($\pm 0,03$)	0,66 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 8 SK	0,65 a ($\pm 0,03$)	0,62 a ($\pm 0,02$)	0,63 a ($\pm 0,02$)	0,66 a ($\pm 0,03$)
Média	0,65	0,65	0,65	0,66
Valor F	1,20 ^{ns}	1,51 ^{ns}	1,80 ^{ns}	0,18 ^{ns}
DMS	0,05	0,06	0,04	0,07
CV (%)	3,77	4,37	3,34	4,81

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; (Sem tráfego das máquinas de colheita da madeira (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

A umidade, textura e teor de matéria orgânica do solo são parâmetros que apresentam grande variação em relação à porosidade total. Para Prevedello (1996), solos arenosos tendem a apresentar uma porosidade total entre 0,35 a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, enquanto solos com textura argilosa, uma PT de 0,40 a 0,65 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, e solos com textura média, uma porosidade intermediária.

Ao observar os valores de porosidade total na Tabela 7, alguns resultados foram superiores aos descritos pelo autor acima, porém com diferença não significativa, justificado pela grande quantidade de argila presente nas camadas avaliadas, que variaram de textura argilosa a muito argilosa, e com tendência de apresentar maior quantidade de microporos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Sampietro (2010), que avaliou a compactação ocasionada por diferentes intensidades de tráfego de um *feller buncher* e *skidder* em um Cambissolo Húmico e Neossolo Regolítico Húmico com distintas classes de umidade, e observou que o aumento das intensidades de passadas das máquinas de colheita da madeira provocou a redução da porosidade total nas profundidades 0-15; 15-30 e 30-50 cm.

Lopes et al. (2015) observaram que a porosidade total de um Cambissolo Háplico não apresentou diferença estatística entre os tratamentos (AT- antes do tráfego das máquinas; HV-

após o tráfego do *harvester*; FW- após o tráfego do *forwarder*) e entre as profundidades avaliadas (0-15 e 15-30 cm), e mesmo não ocorrendo diferenças significativas, o tráfego das máquinas de colheita da madeira contribuiu para a de redução na porosidade, sendo a camada superficial do solo a mais afetada pelo tráfego.

5.5. Microporosidade

Os valores médios de microporosidade (MI) estão descritos na Tabela 8. Como pode ser observado, os valores MI foram significativos apenas para a camada de 0-10 cm, enquanto nas demais camadas (10-20, 20-40 e 40-60 cm) não mostraram resultados significativos entre os tratamentos. Verificando os valores de microporosidade existentes em todas as profundidades avaliadas, nota-se que conforme se intensificou o número de passadas das máquinas, os valores de MI aumentaram. De acordo com Smith et al. (1997), tal incremento da porosidade que ocorre após o tráfego das máquinas pode ser justificado pela compressão do espaço poroso ocasionado pela compactação, fazendo com que ocorra a desestruturação e o rearranjo das partículas do solo.

Observando os valores de microporosidade da camada de 0-10 cm, verifica-se um aumento gradativo e significativo de MI em relação à intensidade de passadas das máquinas, sendo que para a testemunha, a microporosidade apresentou um valor de $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto após 1 passada do *feller direcional* e 8 passadas do *skidder* o valor aumentou para $0,59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, resultando no acréscimo de 13,55% em relação as condições iniciais sem tráfego.

Tal resultado pode ser explicado pelo fato de quando o solo fica exposto a diferentes pressões exercidas pelas máquinas (pressão= razão entre o peso da máquina e a área de contato dos rodados com o solo), fazendo com que ocorra a compressão e o rearranjo dos macroporos, transformando-os em microporos. Portanto em áreas de intenso tráfego de máquinas, a tendência é que se tenha um maior número de microporos devido ao detrimento dos macroporos. Essa redução do tamanho dos poros faz com o que o solo apresente dificuldade em infiltrar água e se torne mais susceptível ao escoamento superficial, favorecendo a formação de sulcos e erosões.

Tabela 8. Valores médios e desvio padrão (\pm) da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
Testemunha	0,51 b ($\pm 0,04$)	0,53 a ($\pm 0,03$)	0,56 a ($\pm 0,03$)	0,59 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 1 SK	0,57 ab ($\pm 0,02$)	0,57 a ($\pm 0,02$)	0,61 a ($\pm 0,02$)	0,60 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 2 SK	0,57 ab ($\pm 0,04$)	0,58 a ($\pm 0,02$)	0,56 a ($\pm 0,05$)	0,57 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 4 SK	0,58 ab ($\pm 0,03$)	0,58 a ($\pm 0,02$)	0,58 a ($\pm 0,02$)	0,61 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 8 SK	0,59 a ($\pm 0,02$)	0,57 a ($\pm 0,05$)	0,55 a ($\pm 0,03$)	0,61 a ($\pm 0,02$)
Média	0,56	0,56	0,57	0,60
Valor F	4,03 *	1,54 ^{ns}	2,03 ^{ns}	0,64 ^{ns}
DMS	0,06	0,07	0,06	0,07
CV (%)	5,12	5,58	5,34	5,80

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %; (Sem tráfego das máquinas de colheita da madeira (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; * significativo a 5%; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Analisando a camada de 10-20 cm, observa-se que os valores de microporosidade não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, variando de $0,53 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ na testemunha, a $0,58 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para as intensidade de tráfego de 1 FD + 2 SK e 1 FD + 4 SK, resultando em um aumento de 8,62% nos valores de MI. Acréscimos semelhantes de MI também foram observados nas camadas de 20-40 e 40-60 cm em relação à condição sem tráfego (testemunha) e após passadas das máquinas.

Apesar dos resultados obtidos nestas três camadas não serem significativos, foi possível observar que os valores da microporosidade se tornaram maiores com o aumento da intensidade de passadas das máquinas da colheita da madeira.

Cavichiolo et al. (2005), avaliando as modificações nos atributos físicos de solos com diferentes classes texturais submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de Eucalipto, notaram que os valores de macroporosidade e microporosidade não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos e profundidades estudadas, tanto no solo de textura média

quanto no solo de textura argilosa. Porém, os autores relatam que o solo de textura média poderia apresentar uma redução de 50% do valor de macroporosidade para se assemelhar a quantidade poros do solo de textura argilosa, fato que comprova que a infiltração de água tende a ser deficiente para esse tipo de solo.

5.6. Macroporosidade

De acordo com Tabela 9, os tratamentos avaliados apresentaram baixos valores de macroporosidade (MA) ao longo da profundidade do solo. Para Reichert et al. (2007), valores de MA abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ já são considerados críticos ao desenvolvimento e crescimento das plantas. Sendo assim, os valores de MA obtidos neste trabalho após o tráfego das máquinas foram inferiores ao apresentado pelos autores, comprovando a ocorrência de compactação do solo.

Tabela 9. Valores médios e desvio padrão (\pm) da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)			
	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
Testemunha	0,15 a ($\pm 0,07$)	0,13 a ($\pm 0,03$)	0,10 a ($\pm 0,03$)	0,07 ab ($\pm 0,02$)
1 FD + 1 SK	0,08 ab ($\pm 0,02$)	0,10 ab ($\pm 0,03$)	0,06 b ($\pm 0,02$)	0,07 ab ($\pm 0,02$)
1 FD + 2 SK	0,07 ab ($\pm 0,02$)	0,08 ab ($\pm 0,03$)	0,08 ab ($\pm 0,01$)	0,08 a ($\pm 0,02$)
1 FD + 4 SK	0,06 b ($\pm 0,02$)	0,08 ab ($\pm 0,03$)	0,07 ab ($\pm 0,01$)	0,05 b ($\pm 0,00$)
1 FD + 8 SK	0,06 b ($\pm 0,02$)	0,06 b ($\pm 0,01$)	0,07 ab ($\pm 0,03$)	0,05 ab ($\pm 0,01$)
Média	0,09	0,09	0,07	0,06
Valor F	3,95 *	3,60 *	3,84 *	4,09 *
DMS	0,08	0,06	0,03	0,02
CV (%)	43,93	29,17	21,16	18,99

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %; (Sem tráfego das máquinas de colheita da madeira (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; * significativo a 5%; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

É possível observar que, conforme aumentou a intensidade de tráfego das máquinas de colheita da madeira, os valores de macroporosidade diminuíram significativamente, principalmente nos tratamentos 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK. As camadas superficiais do solo (0-10 e 10-20 cm) foram as mais afetadas, sendo que antes da ocorrência das passadas das máquinas, tais camadas apresentavam valores de MA variando de 0,15 e 0,23 m³m⁻³, respectivamente. Logo após o tráfego das máquinas, ambos os valores diminuíram para 0,06 m³m³, apresentando uma redução entre 60 e 46,15% em relação as condições iniciais sem o tráfego das máquinas.

Resultados semelhantes também foram obtidos por Rosa et al. (2012), que verificaram que a camada superficial do solo (0-5 cm) apresentou diferenças significativas em relação à macroporosidade no tratamento com maior intensidade de tráfego. Marsili et al. (1998) também notaram um decréscimo da MA na camada superficial (0-10 cm) após uma passada de dois tratores diferentes, sendo intensificado após quatro passadas das máquinas.

Na profundidade de 20-40 cm, ocorreram diferenças significativas nos tratamentos avaliados, onde a testemunha apresentou um maior valor de macroporosidade (0,10 m³m⁻³), sendo o menor valor encontrado no tratamento 1 FD + 1 SK com 0,06 m³m⁻³. Tal decréscimo de MA verificado após uma passada do *feller direcional* e uma passada do *skidder* foi significativo, podendo ser explicado devido à heterogeneidade do solo, que tende a apresentar variações nas suas propriedades e estruturas em curtas distâncias. Essa justificativa também pode ser usada para explicar os resultados encontrados na camada de 40-60 cm, sendo que o valor mais alto de macroporosidade foi encontrado no 1 FD + 2 SK (0,08 m³m⁻³), enquanto os menores valores nos tratamentos 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK (0,05 e 0,05 m³m⁻³).

As profundidades de 20-40 e 40-60 cm foram àquelas menos afetadas pelas passadas das máquinas em comparação às camadas superficiais (0-10 e 10-20 cm), que antes o tráfego das máquinas (testemunha) já apresentava um baixo valor de macroporosidade, sendo característico das condições normais solo avaliado.

A textura do solo pode exercer influência sobre essa propriedade física entre as camadas de 20-40 e 40-60 cm, pois são classificadas como muito argilosas, enquanto as camadas superficiais são argilosas. Sendo assim, solos mais argilosos tendem a apresentar maior quantidade de microporos ao invés de macroporos, fato condizente com os valores de microporosidade apresentado na Tabela 8.

Mello-Ivo et al. (2006) observaram que houve reduções da macroporosidade do solo nos rastros das máquinas em aproximadamente 50% quando comparada com as demais áreas avaliadas, fato que levaram os autores a concluir que reduções da macroporosidade traz como consequência a diminuição drástica do volume de água disponível para plantas. Szymczak et al. (2014) relataram que a macroporosidade nas camadas de 0-5 e 5-10 cm após as atividades de colheita da madeira sofreu compactação, com redução entre 60 a 50%, respectivamente, nos valores de MA em relação as condições iniciais do solo.

Guilherme et al. (2014) avaliando o efeito do tráfego das máquinas sobre os atributos físicos do solo, observaram que a macroporosidade diminuiu com o aumento das passadas dos tratores agrícolas, sendo que a camada superficial 0-10 cm foi aquela que sofreu maiores alterações, apresentando valores de macroporosidade ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) nas condições sem tráfego e ($0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) após seis passadas das máquinas.

A redução da macroporosidade em valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ tende a ocasionar uma série de problemas no crescimento e desenvolvimento das plantas. Alguns desses distúrbios são citados por Sojka (1992), que são o fechamento dos estômatos que pode ocasionar o murchamento das plantas, obstrução do xilema à água, necrose de raízes, interferência nutricional e hormonal das plantas.

A relação entre a porosidade do solo com o teor argila se modifica devido ao rearranjo das partículas. De acordo com Suzuki (2008b), a fração argila apresenta formato laminar e conforme aumenta o seu teor, as partículas se unem reduzindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade, resultando em uma massa argilosa homogênea. Sendo assim, o solo avaliado neste trabalho de textura argilosa a muito argiloso condiz com as propostas pelos autores acima, apresentando um elevado valor de microporosidade e baixo de valor de macroporosidade.

5.7. Resistência mecânica do solo à penetração

Na Figura 13 é mostrada a resistência mecânica do solo à penetração (RP) em condições antes do tráfego (Testemunha) e após o tráfego (1 FD + 1 SK; 1 FD + 2 SK ; 1 FD + 4 SK; 1 FD + 8 SK) na profundidade de 0-40 cm, enquanto na Figura 14 é ilustrado os valores de umidade volumétrica do solo (U_v) no momento das em que foram realizadas as leituras da RP.

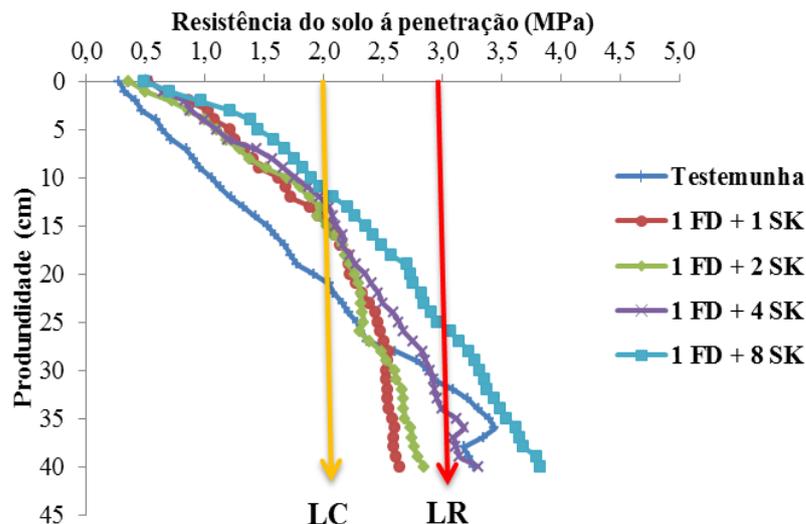


Figura 13: Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Em que: Sem tráfego (Testemunha) e após o tráfego 1 FD + 1 SK (1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder*), 1 FD + 2 SK (1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder*), 1 FD + 4 SK (1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder*), 1 FD + 8 SK (1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder*); LC = limite crítico para o desenvolvimento das plantas de acordo com Lapen et al. (2004) e LR = limite restritivo para o desenvolvimento das plantas de acordo com Zou et al. (2000).

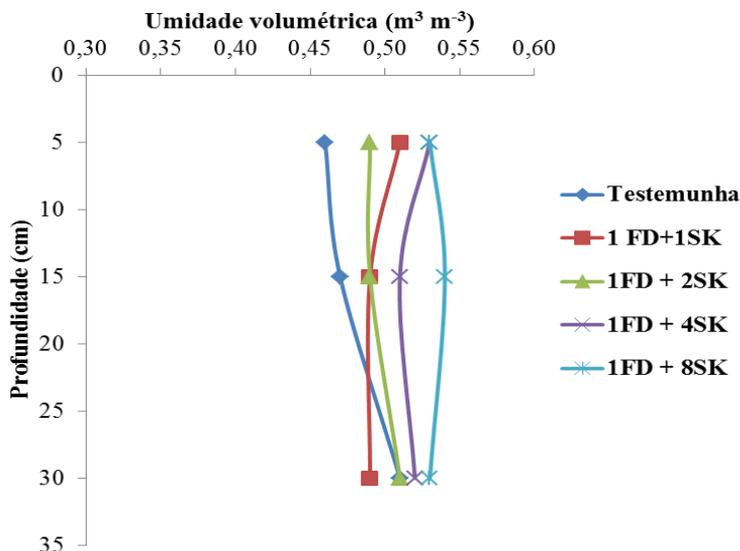


Figura 14. Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) momento das leituras de resistência mecânica do solo à penetração do Nitossolo Bruno estudado, em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Em que: Sem condições de tráfego (Testemunha) e após o tráfego 1 FD + 1 SK (1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder*), 1 FD + 2 SK (1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder*), 1 FD + 4 SK (1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder*), 1 FD + 8 SK (1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder*).

O tráfego das máquinas, independente da intensidade, contribuiu com o incremento da RP até a profundidade de 25 cm quando comparado à testemunha, ficando evidente a maior sensibilidade do solo à compactação na camada superficial do solo. Observa-se que o 1 FD + 1 SK, 1 FD + 2 SK, 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK ultrapassaram o limite crítico para o desenvolvimento das plantas, que é de 2 MPa antes dos 15 cm de profundidade.

É possível notar que, a intensidade de tráfego de 1 passada do *feller direcional* e 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK) apresentou os maiores valores de resistência à penetração ao longo de todo o perfil do solo (0-40 cm), ultrapassando o limite restritivo para o desenvolvimento das plantas (3 Mpa) considerado por Zou et al., (2000) na profundidade de 25 cm. Observa-se que além de 1 FD + 8 SK, os tratamentos 1 FD + 4 SK e a testemunha também ultrapassaram o limite restritivo em profundidade de aproximadamente 30 cm.

O comportamento das curvas do 1 FD + 1 SK, 1 FD + 2 SK e 1 FD + 4 SK foram semelhantes entre si, conforme ilustrado na Figura 13. Porém, entre as profundidades de 3 a 7 cm na condição de 1 FD + 1 SK a RP apresentou resultados superiores a 1 passada do FD + 2 passadas do SK e 1 passada do FD + 4 passadas do SK, podendo ser explicado pela mudança na estrutura do solo ocasionada por diferentes pressões exercidas pelas máquinas. Sendo assim, a mesma justificativa pode ser empregada para explicar os incrementos de RP de 1 FD + 1 SK em relação ao 1 FD + 2 SK entre as profundidades de 23 a 28 cm.

Percebe-se que a partir da profundidade 25 cm, a RP da testemunha aumentou consideravelmente, apresentando maiores valores de RP quando comparado com as diferentes intensidades de tráfego de 1 FD + 1 SK; 1 FD + 2 SK e 1 FD + 4 SK. Isso pode ocorrer devido à acomodação natural das partículas do solo, como o aumento do teor de argila e redução da matéria orgânica em profundidade, heterogeneidade do solo e o teor de água no momento da leitura a campo.

Como pode ser visto na Figura 14, os valores de umidade volumétrica no momento das leituras de RP da camada de 20-40 cm para a testemunha foi de $0,47 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$, enquanto a Uv das intensidades de 1 FD + 1 SK, 1 FD + 2 SK e 1 FD + 4 SK apresentaram valores de 0,44, 0,45 e $0,46 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Isso mostra que a umidade volumétrica do solo pouco afetou a RP durante a obtenção de dados a campo, visto que os teores de Uv estavam altos.

Por isso, é importante restringir o tráfego das máquinas florestais em condições de elevada umidade, conforme observado neste trabalho, a fim de se obter uma menor alteração das propriedades físicas do solo, favorecendo o desenvolvimento das rotações futuras. A subsolagem

do solo também é considerada um fator importante, pois ajuda a eliminar a compactação superficial e subsuperficial, além de favorecer a decomposição da matéria orgânica acumulada em superfície.

O tráfego das máquinas de colheita da madeira causou alterações na RP até as maiores profundidade do solo. Tais resultados também foram encontrados por Seixas e Oliveira Júnior (2001), que observaram que o tráfego de máquinas de colheita de madeira causou compactação no solo e aumentou a RP conforme o aumento da profundidade.

Prevedello et al. (2013) trabalhando com o manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* em um Argissolo, notaram que efeito acumulativo das pressões exercidas sobre o solo pelas máquinas juntamente com os seus implementos e a acumulação natural das partículas neste solo foram os fatores responsáveis pelo aumento da RP em profundidade.

A RP é uma propriedade física do solo considerada sensível, pois é afetada pela densidade, umidade e textura do solo. Roselem et al. (1999), avaliando a RP em cinco solos com classes texturais diferentes, concluíram que quanto maior for o teor de argila no solo, maior será a RP. Já Assis et al. (2009) avaliaram quatro solos com diferentes teores de argila, areia e silte e também concluíram que a textura do solo foi significativa e influente nos resultados da RP, sendo os solos com maiores teores de argila, aqueles que apresentaram valores mais elevados de RP quando comparado com os solos mais arenosos.

Com base nos estudos citados acima, pode-se afirmar que o teor de argila influenciou nos resultados de RP deste trabalho, onde os maiores valores estão presentes na camada de 20-40 cm que possui textura muito argilosa conforme mostrado na Tabela 4. Em relação às camadas de 0-10 e 10-20 cm, que possuem textura argilosa, apresentaram menores valores de RP, quando comparado com a camada de 20-40 cm. Além disso, a presença de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo pode ter contribuído para a redução da RP, pois a MO tem alta capacidade de retenção de água e ajuda a manter a umidade do solo.

Os valores médios de resistência mecânica à penetração (MPa) e de umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$), estão ilustrados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores médios e desvio padrão (\pm) da resistência do solo à penetração (MPa) e de umidade volumétrica (m^3m^{-3}), do Nitossolo Bruno estudado em condições sem tráfego e após diferentes intensidades de tráfego do *feller direcional* e *skidder*.

Tratamento	Resistência do solo à penetração (MPa)		
	Profundidade (cm)		
	0-10	10-20	20-40
Testemunha	0,65 b ($\pm 0,12$)	1,53 b ($\pm 0,35$)	2,80 a ($\pm 1,03$)
1 FD + 1 SK	1,13 a ($\pm 0,18$)	1,99 ab ($\pm 0,13$)	2,51 a ($\pm 0,52$)
1 FD + 2 SK	1,05 ab ($\pm 0,23$)	2,05 a ($\pm 0,29$)	2,55 a ($\pm 0,91$)
1 FD + 4 SK	1,14 a ($\pm 0,20$)	2,12 a ($\pm 0,22$)	2,87 a ($\pm 0,90$)
1 FD + 8 SK	1,35 a ($\pm 0,24$)	2,37 a ($\pm 0,32$)	3,30 a ($\pm 1,16$)
MG	1,06	2,01	2,80
Valor F	6,84 **	7,16 **	2,57 ^{ns}
DMS	0,44	0,51	0,89
CV (%)	18,56	11,42	14,19
Tratamento	Umidade volumétrica (m^3m^{-3})		
	Profundidade (cm)		
	0-10	10-20	20-40
Testemunha	0,46 a ($\pm 0,05$)	0,46 a ($\pm 0,03$)	0,51 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 1 SK	0,51 a ($\pm 0,05$)	0,49 a ($\pm 0,04$)	0,48 a ($\pm 0,01$)
1 FD + 2 SK	0,49 a ($\pm 0,03$)	0,49 a ($\pm 0,04$)	0,51 a ($\pm 0,03$)
1 FD + 4 SK	0,53 a ($\pm 0,03$)	0,51 a ($\pm 0,03$)	0,52 a ($\pm 0,04$)
1 FD + 8 SK	0,53 a ($\pm 0,06$)	0,53 a ($\pm 0,04$)	0,52 a ($\pm 0,02$)
MG	0,50	0,50	0,51
Valor F	2,15 ^{ns}	1,80 ^{ns}	1,01 ^{ns}
DMS	0,09	0,08	0,06
CV (%)	8,03	7,58	5,72

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %; (Sem tráfego das máquinas de colheita da madeira (Testemunha); 1 passada do *feller direcional* + 1 passada do *skidder* (1 FD + 1 SK), 1 passada do *feller direcional* + 2 passadas do *skidder* (1 FD + 2 SK), 1 passada do *feller direcional* + 4 passadas do *skidder* (1 FD + 4 SK), 1 passada do *feller direcional* + 8 passadas do *skidder* (1 FD + 8 SK); MG: média geral; ns não significativo; * significativo a 5%; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Como pode ser observado, a RP apresentou resultados significativos entre todos os tratamentos avaliados nas camadas de 0-10 e 10-20 cm. Com relação à comparação da RP entre as profundidades do solo, percebe-se que a camada de 20-40 cm apontou os maiores valores em relação às profundidades de 0-10 e 10-20 cm, sendo que a Uv não se diferenciaram estatisticamente entre as camadas, com exceção da Uv nas camadas de 0-10 e 10-20 e 20-40 cm para o tratamento 1 FD + 2 SK.

Diferenças dos valores de RP entre as diferentes intensidades de tráfego eram esperadas. Observando a Tabela 10, verifica-se que as intensidades de tráfego (1 FD + 1 SK; 1 FD + 4 SK e 1 FD + 8 SK) não diferiram entre si para a camada de 0-10 cm, porém, apresentaram diferenças em relação aos demais tratamentos avaliados (Testemunha e 1 FD + 2 SK). Isso indica que de todas as condições avaliadas, após 1 passada do FD + 4 passadas do SK (1 FD + 4SK), não há mais efeitos significativos no aumento da RP. O menor aumento na resistência à penetração foi verificado na condição 1 FD + 2 SK, mostrando que essa condição alterou menos o solo do que a condição de tráfego 1 FD + 1 SK, conforme citado anteriormente isso pode acontecer devido a heterogeneidade do solo.

Para a camada de 10-20 cm, o maior número de passadas das máquinas (1 FD + 8 SK) apresentou o maior valor médio de RP (2,37 MPa), resultando em incremento de 35,4% em relação a condição sem tráfego (Testemunha), que teve menor valor de RP (1,53 MPa). Em relação às demais intensidades de tráfego, verifica-se um incremento da RP conforme o aumento do número de passadas das máquinas. Resultados semelhantes foram encontrados por Sampietro e Lopes (2011), que avaliaram a compactação causada por diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira, concluindo que o aumento do número de passadas do *feller buncher* e *skidder* provocaram incrementos na densidade e resistência à penetração do solo.

Para Reichert et al. (2007), a profundidade de compactação do solo varia conforme as condições do solo, as características das máquinas, os tipos de rodados, o número de passadas das máquinas, o histórico de pressões e o manejo do solo. Os autores ainda relatam que em áreas florestais, a compactação do solo tende a atingir profundidades mais elevadas devido ao maior peso e intensidade de tráfego das máquinas. A textura do solo também é considerada um fator influente, pois quanto maior for o teor de argila no solo maior tende a ser os valores de RP.

5.8. Ensaio de Proctor normal

A Figura 15 ilustra as curvas de compactação do Nitossolo Bruno estudado de acordo com as diferentes profundidades avaliadas. Como pode ser observado, independentemente da textura das profundidades do solo, à medida que a umidade gravimétrica aumentou, a densidade do solo também aumentou, atingindo um valor máximo e, a seguir, diminuiu devido à baixa compressibilidade da água. Utilizando as equações polinomiais de 2º grau, foi possível obter o valor da umidade ótima para a compactação do solo e a densidade máxima do solo (Tabela 11).

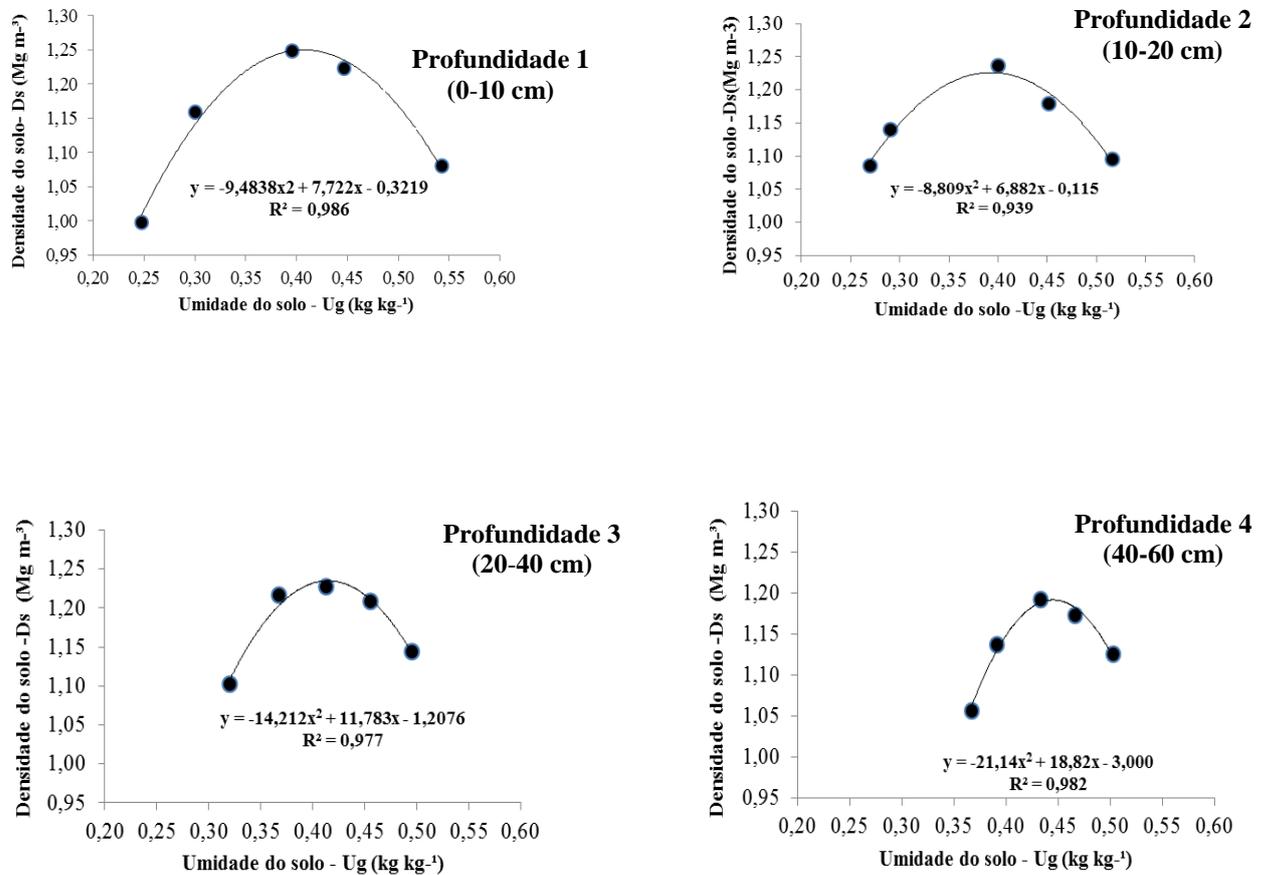


Figura 15. Curvas de compactação realizadas pelo ensaio de Proctor normal do Nitossolo Bruno nas quatro profundidades avaliadas.

Em que: Densidade máxima do solo (Mg m⁻³) e umidade ótima do solo (kg kg⁻¹).

Tabela 11. Densidade do solo máxima (Mg m^{-3}), umidade ótima (kg kg^{-1}), umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}), densidade do solo após o tráfego das máquinas (Mg m^{-3}), e grau de compactação (%) do Nitossolo Bruno estudado nas quatro profundidades diferentes avaliadas neste trabalho.

Profundidade (cm)	Ds máxima (Mg m^{-3})	Ug ótima (kg kg^{-1})	Ug solo (kg kg^{-1})	Ds APT (Mg m^{-3})	GC (%)
0-10	1,25	0,41	0,45	1,16	92,80
10-20	1,23	0,39	0,45	1,15	93,50
20-40	1,23	0,41	0,46	1,12	91,06
40-60	1,19	0,45	0,48	1,12	94,12

Nas diferentes profundidades estudadas, os valores da densidade máxima do solo seguiu a seguinte ordem crescente: Profundidade 1 (0-10 cm) > Profundidade 2 (10-20 cm) = Profundidade 3 (20-40 cm) > Profundidade 4 (40-60 cm). Esse incremento da densidade do solo máxima nas primeiras camadas segue a mesma tendência da fração areia (Tabela 4). De acordo com Ohu et al. (1985), isto pode ocorrer devido a forma irregular dos grãos de areia que apresenta maior capacidade empacotamento das partículas do solo.

Já os valores da umidade ótima que proporciona a densidade máxima do solo, seguiram a seguinte ordem crescente: Profundidade 4 (40-60 cm) > Profundidade 3 (20-40 cm) e Profundidade 1 (0-10 cm) > Profundidade 2 (10-20 cm), seguindo a mesma tendência do teor de argila, que aumentou conforme a profundidade do solo, exceto na profundidade 2 que apresentou um teor de argila um pouco maior em relação à profundidade 1, porém necessitando de menor teor de água para atingir a máxima compactação. Sendo assim, o aumento da umidade ótima com o teor de argila presente no solo pode estar relacionado com a capacidade de adsorção de água.

Segundo Klein (2014), a umidade ótima para atingir a máxima compactação do solo pode ser interpretada como “umidade péssima” para a realização de trabalhos com máquinas agrícolas, pois são nessas condições que ocorrem com mais facilidade as alterações na estrutura do solo, acarretando a compactação.

A umidade do solo no momento do tráfego das máquinas, conforme ilustrado na Tabela 11 foram superiores aos valores das umidades ótimas de compactação encontradas pelo teste de Proctor normal, que variaram entre (0,39 a 0,45 kg kg^{-1}). Porém, isso não significa que o solo deveria ter alcançado a sua densidade máxima, pelo fato que as umidades no momento de coleta das amostras apresentavam um teor maior que a umidade ótima para a compactação, pois além

da umidade, a compactação também depende da pressão que as máquinas exercem sobre o solo, estrutura, textura e tipo do solo.

Verificou-se ainda que, com o aumento da profundidade do solo, o grau de compactação também aumentou. Para Suzuki et al. (2007), incrementos no grau de compactação estão diretamente ligados aos valores críticos da macroporosidade e resistência mecânica à penetração do solo. E ao observar as Tabelas 9 e 10, nota-se que a macroporosidade diminuiu com a profundidade do solo, ultrapassando o limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto a resistência mecânica aumentou com profundidade do solo, transcendendo os limites restritivos e críticos para o desenvolvimento de culturas florestais, e confirmando a relação entre essas propriedades físicas com o grau de compactação.

Na Figura 16 são apresentadas as curvas de compactação realizadas pelo ensaio de Proctor normal referente às profundidades avaliadas no experimento em relação aos teores de argilas em cada profundidade. Nota-se que, conforme aumentou o teor de argila, a densidade máxima do solo diminuiu e a umidade ótima de compactação aumentou. Sendo assim, quanto maior for o teor de argila no solo, menor tende a ser a sua densidade máxima. Resultados semelhantes também foram encontrados por Klein (2014) e Krzic et al. (2003).

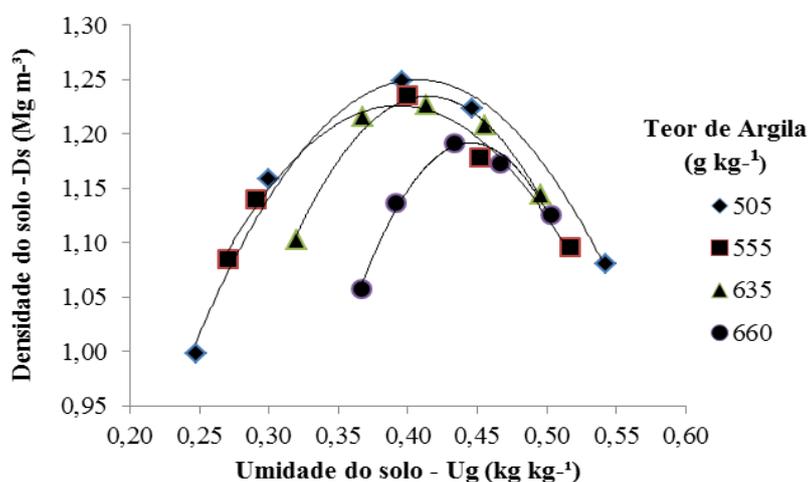


Figura 16. Curvas de compactação realizadas pelo ensaio de Proctor Normal do Nitossolo Bruno nas quatro profundidades avaliadas em relação ao teor de argila.

Em que: \blacklozenge Profundidade 1 (0-10 cm); \blacksquare Profundidade 2 (10-20 cm); \blacktriangle Profundidade 3 (20-40 cm) e \bullet Profundidade 4 (40-60 cm). Densidade máxima do solo (Mg m^{-3}) e umidade ótima do solo (kg kg^{-1}).

Para Braida et al. (2011), a susceptibilidade à compactação do solo, quando avaliada pelo ensaio Proctor normal, se torna menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo. De acordo com a Tabela 5, os valores de matéria orgânica decresceram conforme aumentou a profundidade do solo. Portanto, observa-se um efeito contrário ao relatado pelos autores, sendo que os maiores valores de densidade máxima do solo foram encontrados nas primeiras profundidades. Portanto, isso demonstra que a matéria orgânica não influenciou na obtenção dos resultados da densidade máxima entre as primeiras profundidades do solo.

Braida et al. (2006) explicam que o efeito da matéria orgânica sobre os parâmetros da curva de compactação obtida pelo ensaio de Proctor normal é maior para solos arenosos em comparação aos solos argilosos. Os autores relatam que, a presença de matéria orgânica em solos arenosos tende a reduzir o efeito lubrificante da água entre as partículas minerais do solo em maiores proporções. Tal fato ocorre devido à matéria orgânica apresentar uma área superficial específica (ASE) e capacidade de troca de cátions (CTC), que determina uma capacidade de retenção de água maior em relação ao solo arenoso, que apresenta uma menor ASE e CTC praticamente nula. Sendo assim, a matéria orgânica consegue reter maior quantidade de água quando comparada com a areia, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia. Já no solo argiloso, as diferenças entre os minerais e a matéria orgânica são menores, ou seja, a interação entre as frações orgânicas e minerais é maior, resultando em menor disponibilidade da matéria orgânica para interagir com a água adicionada ao solo.

6. CONCLUSÕES

- O aumento da intensidade do tráfego das máquinas contribuiu para a ocorrência de maiores alterações nos atributos físicos do solo em relação à sua condição inicial, afetando principalmente as camadas superficiais do solo.
- Todas as simulações de tráfego estudadas causaram aumento na resistência mecânica do solo à penetração na camada superficial do solo, ultrapassando o valor crítico de 2 MPa para desenvolvimento das culturas florestais.
- As maiores intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira apresentaram valores de RP acima do limite restritivo ao desenvolvimento das culturas florestais.
- O ensaio de Proctor normal mostrou os valores de densidade máxima do solo que poderiam ser obtidas com as diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira, porém não foram observados valores de densidade máxima no solo estudado, mesmo em condições de umidade ótima para a compactação.
- O aumento do tráfego das máquinas de colheita da madeira contribuiu para a formação de sulcos no solo, podendo causar para maiores impactos ambientais no ecossistema florestal.

7. RECOMENDAÇÕES

Ao término desse trabalho e em função dos resultados obtidos, recomenda-se à empresa:

- Planejar as operações de colheita da madeira, estabelecendo restrições ao tráfego das máquinas em dias chuvosos ou com elevados teores de água, evitando a compactação e formação de sulcos no solo, e conseqüentemente, possíveis impactos no ecossistema florestal.
- Controlar o número de passadas das máquinas de colheita da madeira e estabelecer trilhas específicas de tráfego, com o intuito de concentrar os danos causados ao solo em uma menor área possível.
- Realizar a análise granulométrica, resistência mecânica à penetração do solo e o ensaio de Proctor normal em todas as áreas florestais da empresa, visando criar um mapa de sensibilidade do solo, com o objetivo de auxiliar no planejamento e execução das operações das atividades colheita da madeira e implantação florestal.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, R. L. D. LAZARINI, G. D. LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 558-568, 2009.
- AUST, W.M.; T.W. REISINGER; B.J. STOKES & J.A. BURGUER. Tire performance as a function of width and number of passes on soil bulk density and porosity in a minor stream bottom. In: Seventh Biennial Southern Silvicultural Research Mobile Conference. **Anais...** 1992.
- AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Estudo do solo para fins ambientais**. Santa Maria: Editora Palotti, p. 43, 2003.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, p. 363-375, 1986.
- BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. Tese de Doutorado em Ciência do Solo - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, p. 106, 2004.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.
- BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: Roberto Ferreira de Novais. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.7, p. 221-278, 2011.
- BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos, EESC-USP, p. 131, 1988.
- CANARACHE, A. PENETR - A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.51-70, 1990.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba - SP, Degaspari, p. 132, 1997.
- CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Modificações nos atributos físicos de solos submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, v.29, p.571-577, 2005.
- CHANCELLOR, W. J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Davis: University of California, p. 53, 1977.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 933-942, 2008.

COUTO, R. F. **Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, p. 89, 2012.

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, p. 90, 1993.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na profundidade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, p.383-390, 2005.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 54-94, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro - RJ, p. 212, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3º ed. Brasília-DF, p. 353, 2013.

FENNER, P. T. Compactação do Solo. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**, 3ºed. Ed. UFV, Viçosa – MG, p. 426-447, 2014.

FERNANDES, H. C. SOUZA, A. P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". **Revista Árvore**, v. 27, p. 279-284, 2003.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.487-493, 2000.

FAO- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO model code of Forest harvesting practice Glossary**. 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/v6530e/v6530e12.htm>>. Acesso em: 06 de março de 2015.

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.

GUILHERME, V.; WEBER, F. S.; LOPES, H.; SALVADOR, R.; ALVES, T. T.; STURMER, S. L. K.; VALICHESKI, R. R.. Efeito do tráfego de máquinas sobre atributos físicos do solo e desenvolvimento da aveia preta. In: 7º Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar. **Anais...** Araquari – SC, 2014.

GREGORY, A. S.; WATTS, C. W.; WHALLEY, W. R.; KUAN, H. L.; GRIFFITHS, B. S.; HALLETT, P. D.; WHITMORE, A. P. Physical resilience of soil to field compaction and the

interactions with plant growth and microbial community structure. **European Journal of Soil Science**, v. 58, p. 1221-1232, 2007.

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

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

HILLEL, D. Flow of water in unsaturated soil. In: **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, p. 203-241, 1998.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, v.35, p.23-3, 1995.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. São Paulo – SP. IBÁ, 2015. **Anuário Estatístico**.

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

IEZZI, G.; DOLCE, O.; TEIXEIRA, J. C.; MACHADO, N. J.; GOULART, M. C.; CASTRO, L. R. da S. ; MACHADO, A. dos S. **Matemática**. São Paulo: Atual, p. 325, 1978.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Base Física Política**, 2015. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=25>. Acesso em: 15 de agosto de 2015.

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**. Piracicaba – SP, Editora Agronômica Ceres, p.262, 1979.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 3ª ed. Passo Fundo – RS, Ed. UPF, 2014.

KRZIC, M.; BULMER, C.; TESTE, F.; RAHMAN, S.; DAMPIER, L. **Relative measure of bulk density to characterize compaction of forest soils caused by harvest**. Final Report (R2003-0219) UBC- Vancouver, p. 45, 2003.

LACEY, S.T.; RYAN, P.J. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, v.138, p.321-333, 2000.

LANÇAS, K. P. **Tráfego, tração e compactação: Otimização e desafios**. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Gramado - RS, p. 43, 2007. Disponível em:< http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/KIeberLancas.pdf>. Acesso em: 25 de setembro de 2015.

- LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v.1, p. 277-294, 1985.
- LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: Editora UFV, p. 46-73, 2014.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 89-98, 2010.
- LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP, p. 70, 2004.
- LIMA, M. R.; SIRTOLI, A. E. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba- PR: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, p. 341, 2006.
- LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C. K.; DRINKO, C. H. Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do *Harvester* e do *Forwarder* na colheita de madeira. **Floram**, v. 22, p. 223-230, 2015.
- LOPES, E. 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. **Revista Árvore**, v. 35, p.659-667, 2011a.
- LOPES, E. 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, p. 471-480, 2011b.
- LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; VIEIRA, L. B.; MACHADO, C. C.; RINALD, I, P. C. N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, v. 30, p. 369-376, 2006a.
- LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; MACHADO, C. C.; RINALD, I, P. C. N.; SILVEIRA, J. C. M. Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego do “*Clambunk*”. **Scientia Florestalis**, n. 72, p. 23-28, 2006b.
- MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 3ª ed. Viçosa: UFV, p. 15-45, 2014.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A. M. Sistemas. In: MACHADO, C.C. **Colheita florestal**. 3ed. Viçosa: UFV, p.178-205, 2014.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber and metal tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, v.49, n.2, p.185-199,1998.

McKYES, E.; **Soil cutting and tillage**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V. p.217. 1985.

MELLO-IVO, W. M. P.; ROSS, S. Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um latossolo amarelo sob floresta na Amazônia central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.769-776, 2006.

MIALHE, L.G. O estado da arte e perspectivas da utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: ENCONTRO SOBRE PNEUS DE ALTA FLUTUAÇÃO E BAIXA PRESSÃO NAS ÁREAS AGRÍCOLA E FLORESTAL. **Anais...** Piracicaba - SP: ESALQ, p. 1-17, 1993.

MOZART, M. F. **Caracterização física do solo**. In: JONG van LIER, Q. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-24, 2010.

NUGENT, C.; KANALI, C.; OWENDE, P. M.O; NIEUWENHUIS, M.; WARD, S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. **Forest Ecology and Management**, v. 180, p. 85–98, 2003.

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristic of compacted soils. **Transaction of American Society of Agricultural and Engineering**, v.28, p.420-424, 1985.

OLIVEIRA, J. O. A. P.; VIDIGAL FILHO, P. S.; TORMENA, C. A.; PEQUENO, M. G. SCAPIM, C. A.; MUNIZ, A. S.; SAGRILO, E. Influências de sistemas de preparo do solo na produtividade de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25, p. 443-450, 2001.

PEZZONI FILHO, J. C.; FENNER, P. T.; LANÇAS, K. P.; PEZZONI, D.; MORAES, W. B.; CHAGAS, H. A.; TROSDORF, J. C. R. Compactação de um Cambissolo Háplico causada pela extração florestal com trator *Skidder*. **Cerne**, v.20, p.199-208, 2014.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de textos, p. 359, 2006.

PREVEDELLO, C. L. **Física do Solo**. Curitiba: UFPR, p. 445,1996.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 129-138, 2013.

RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 285, 2001.

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

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**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p. 49-134, 2007.

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

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 316–330, 2007.

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

ROSA, D. P; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; ROSA, V. T.; VIEIRA, D. A.; REINERT, D. J. Demanda de tração e propriedades físicas de um Argissolo em diferentes manejos e intensidades de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.118-126, 2012.

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

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S. Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder*. **Scientia Forestalis**, v. 39, p. 265-272, 2011.

SAMPIETRO, J. A. **Compactação de Cambissolo e Neossolo causada pela colheita de madeira com *Feller Buncher* e *Skidder***. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Irati-PR, p. 137, 2010.

SANT'ANNA, C. M. Corte. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: Editora UFV, p. 74-105, 2014.

SANCHES, A. C. Manejo para produção sustentável de citros: resultados práticos. In: SIMPÓSIO SOBRE FISIOLOGIA, NUTRIÇÃO, ADUBAÇÃO E MANEJO PARA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE CITROS. **Anais...** Piracicaba - SP, 2000.

SANTOS, B. G.; CORRECHEL, V.; CUNHA, P. P.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; LEANDRO, W. M.; NASCIMENTO, J. B.; CARVALHO, G. D. Resistência mecânica de um solo cultivado com algodoeiro em sistema de preparo convencional em Ipameri – GO. In: V Congresso Brasileiro de Algodão. **Anais...** Salvador –BA, 2005a.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5º ed. Viçosa –MG, SBCS, 2005b.

SATO, M. K.; OLIVEIRA, P. D.; LIMA, H. V. TEXTURA E GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS. In: 9º Seminário Anual de Iniciação Científica da UFRA. **Anais...** Belém – PA, 2011.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 797-804, 2004.

SEIXAS, F.; CASTRO, G. P. Extração. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: Editora UFV, p. 106-161, 2014.

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

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

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 60, p.73-87, 2001.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. Tese de livre-docência - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP, p. 75, 2000.

SILVA, S. G. C. **Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**. Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba –SP , p. 67, 2011.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Tese de Doutorado em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, p. 171, 2003.

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

SILVEIRA, G. M. **Preparo do solo: técnicas e implementos**. Viçosa: Aprenda Fácil, p. 292, 2001.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997.

SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W.; PAINTER, D. J. Compaction by agricultural vehicles: a review. **Soil & Tillage Research**, v.1, p.373-400, 1980.

SOJKA, R. E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of America Journal**, v. 154, p. 269-280, 1992.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 963-973, 2008a.

SUZUKI, L. E. A. S. **Qualidade físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, p. 138, 2008b.

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; DAL'COL -LÚCIO, A.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na reigão Sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38, p. 641-648, 2014.

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

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetrations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONCALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p.795-801, 2002.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Mcgraw-Hill do Brasil, P. 509, 1977.

VASCONCELOS, R. F. B. CONTALICE, J. R. B.; MOURA, G. B. A.; ROLIM, M. M.; MONTENEGRO, C. E. V. Compactabilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 537-545, 2012.

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**, Collingwood, v.38, n.5, p.947-958, 2000.