

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS DOIS VIZINHOS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

DIEGO RODRIGUES

**COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS O TRÁFEGO DE MÁQUINAS EM  
OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DOIS VIZINHOS

2018

DIEGO RODRIGUES

**COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS O TRÁFEGO DE MÁQUINAS EM  
OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior em Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para aprovação da disciplina.

Orientador: André Pellegrini

DOIS VIZINHOS

2018



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### COMPACTAÇÃO DO SOLO APÓS O TRÁFEGO DE MÁQUINAS EM OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL

Por

Diego Rodrigues

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 21 de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal. O (a) candidato (a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. André Pellegrini  
Orientador

---

Prof. Dr. Laércio Ricardo Sartor  
Membro titular (UTFPR)

---

Eng. Agrônoma Daiane Cristina Zanellato  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso [F1]-

## RESUMO

RODRIGUES, D. **Compactação do solo após tráfego de máquinas em operações de colheita florestal**. 2018. 45 f. Trabalho de conclusão de curso II. Curso Superior de Engenharia Florestal, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos. Dois Vizinhos, 2018.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas em operações de colheita de *Pinus taeda*. O estudo foi realizado nas áreas operacionais de colheita de madeira pertencente à empresa Araupel S/A, que está localizada no município de Quedas do Iguaçu, Paraná. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. O procedimento de amostragem do solo foi realizado sobre a linha de passagem das máquinas de corte e extração da madeira, de acordo com os seguintes tratamentos: T0 (Sem passagem de máquinas com a floresta em pé), T1 (1 passada do *Havester* + 1 passada do *Forwarder*), T2 (1 passada do *Havester* + 3 passadas do *Forwarder*), T3 (1 passada do *Havester* + 6 passadas do *Forwarder*), T4-1 passada do *Havester* + 8 passadas do *Forwarder*). Para cada tratamento, foram realizadas quatro repetições, distribuídas nas linhas de tráfego das máquinas (figura 9). Foram coletadas 160 amostras, sendo 32 por tratamento, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm em cilindros volumétricos com 3,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro, com auxílio de um extrator para retirada das amostras. A avaliação da compactação foi avaliada com base nos seguintes parâmetros físicos do solo: Densidade (Ds), Porosidade total (Pt), Resistência do solo à penetração (RP) e condutividade hidráulica saturada. Para os dados obtidos nas avaliações dos parâmetros físicos do solo foram submetidos à análise estatística como análise de variância e testes de comparação de médias a partir do teste de Tukey. Com base nos resultados obtidos observou-se que ocorreu maior incremento na densidade do solo com o aumento do número de passadas do *Forwarder*, e todas as situações de tráfego das máquinas estudadas causaram aumento na resistência mecânica do solo à penetração na camada superficial, sendo agravado no T3. A condutividade hidráulica saturada respondeu os efeitos da compactação com os maiores valores de percolação de água no Tratamento sem tráfego de máquinas e ocorrendo menor infiltração na camada superficial de 0-10cm.

**Palavras-chave:** Colheita de madeira; Propriedades físicas; tráfego de máquinas florestais.

## ABSTRACT

RODRIGUES, D. **Soil compaction caused by machine traffic in forest harvesting operations**. 2018. 45 f. Course Conclusion Work II. Superior course of Forest Engineer, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- campus Dois Vizinhos. Dois Vizinhos, 2018.

This work aims to evaluate the soil compaction caused by the traffic of machines in *Pinus taeda* harvesting operations. The study was carried out in the operational areas of harvesting of wood belonging to Araupel S / A, located in the municipality of Quedas do Iguaçu, Paraná. The experimental design was completely randomized. The soil sampling procedure was carried out on the line of wood cutting and extraction machines, according to the following treatments: T0 (Without passing machines with the standing forest), T1 (1 pass of Harvester + 1 (past Harvester + 3 passed from Forwarder), T3 (passed from Harvester + 7 passed from Forwarder), T4-1 (passed from Harvester + 8 passed from Forwarder). For each treatment, four replications were performed, distributed in the traffic lines of the machines (figure 9). A total of 160 samples were collected, 32 of which were treated at depths of 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm in volumetric cylinders with 3.0 cm in height and 6.0 cm in diameter, with the aid of an extractor for withdrawal of samples. The compaction evaluation was evaluated based on the following soil physical parameters: Density (Ds), total porosity (Pt), soil penetration resistance (RP) and saturated hydraulic conductivity. For the data obtained in the evaluations of soil physical parameters were submitted to statistical analysis as analysis of variance and tests of comparison of means from the Tukey test. Based on the results obtained, it was observed that there was a greater increase in soil density with the increase in the number of passes of the Forwarder, and all the traffic situations of the machines studied caused an increase in the mechanical resistance of the soil to the penetration in the superficial layer, being aggravated in T3. The saturated hydraulic conductivity was sensitive to respond to the effects of compaction with the highest values of water percolation in the Treatment without machine traffic and occurring less infiltration in the superficial layer of 0-10cm.

**Keywords:** Wood harvesting; Physical properties; Forest machine traffic.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Sistemas de toras curtas (cut to length).....	14
<b>Figura 2-</b> Sistemas de árvores inteiras (full tree).....	14
<b>Figura 3-</b> Esquema representando o solo em condições de compactação.....	15
<b>Figura 4-</b> Curva de compactação de um solo sofrendo esforço mecânico em função da umidade .....	17
<b>Figura 5-</b> Comportamento de solos com diferentes granulometrias quanto à susceptibilidade à compactação função da umidade e pressão aplicada.....	18
<b>Figura 6-</b> Localização do Município de Quedas do Iguaçu, PR.....	21
<b>Figura 7-</b> Trator florestal <i>Harvester</i> .....	22
<b>Figura 8-</b> Trator florestal <i>Forwarder</i> .....	24
<b>Figura 9-</b> Esquema da coleta de amostras do solo nas diferentes profundidades.....	24
<b>Figura 10-</b> (A) amostras em processo de saturação; (B) amostras na mesa de tensão.....	26
<b>Figura 11-</b> Permeâmetro de carga constante.....	26
<b>Figura 12-</b> Medição de Resistência do solo a penetração.....	27
<b>Figura 13-</b> Classe de valores de condutividade Hidráulica saturada do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	34
<b>Figura 14-</b> Resistência mecânica do solo a penetração (Mpa) do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	37

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Características do povoamento florestal.....	21
<b>Tabela 2-</b> Granulometria média e umidade gravimétrica nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	28
<b>Tabela 3-</b> Valores médios da densidade do solo ( $Mg\ m^3$ ) nas diferentes profundidades de do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	28
<b>Tabela 4-</b> Valores de porosidade total do solo ( $m^3\ m^3$ ) nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	29
<b>Tabela 5-</b> Valores de macroporosidade ( $m^3m^3$ ) nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	30
<b>Tabela 6-</b> Valores de microporosidade nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	31
<b>Tabela 7-</b> Valores médios de condutividade Hidráulica saturada ( $K_{sat}\ m/dia$ ) em diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	32
<b>Tabela 8-</b> Valores médios da resistência do solo à penetração (MPa) do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	34
<b>Tabela 9-</b> Valores médios de umidade gravimétrica (%), do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de <i>Harvester</i> e <i>Forwarder</i> .....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	10
2.1	Objetivo geral .....	10
2.2	Objetivos específicos .....	10
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	11
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
4.1	Setor Florestal .....	12
2.3	Colheita Florestal .....	12
4.2	Sistema de colheita florestal .....	13
4.3	Compactação do solo .....	15
4.3.1	Fatores que influenciam na compactação .....	16
<b>4.4</b>	<b>Atributos físicos do solo</b> .....	19
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	21
5.1	Localização da área de estudo .....	21
5.2	Caracterização da área de estudo .....	21
5.3	Colheita florestal .....	22
5.4	Procedimento amostral .....	23
5.5	Parâmetros físicos do solo .....	24
5.5.1	Análise granulométrica .....	24
5.5.2	Densidade do solo .....	24
5.5.3	Porosidade do solo .....	25
5.5.4	Condutividade Hidráulica Saturada .....	26
5.5.5	Resistência do solo à penetração .....	26
5.6	Análise estatística .....	27
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	28
6.1	Caracterização do solo da área .....	28
6.2	Densidade do solo .....	28
6.3	Porosidade Total .....	29
6.4	Macroporosidade .....	30
6.5	Microporosidade .....	31
6.6	Condutividade Hidráulica Saturada .....	32
6.7	Resistência do solo à penetração .....	34
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	39
<b>8</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	40





## 1 INTRODUÇÃO

O setor florestal é um grande fornecedor de matéria-prima e energia para a indústria, e apresenta importância na economia principalmente no Brasil, por possuir características particulares pelo fato de estar entre os principais detentores de recursos florestais em abundância, e possuir boas áreas disponíveis para expansão (SNIF, 2016).

Devido às características favoráveis, houve maior demanda por produtos de base florestal, tornando necessário à expansão da área coberta por florestas plantadas, o que vem exigindo maior nível tecnológico em todo ciclo de produção, como técnicas modernas de mecanização, tornando o trabalho mais eficiente e econômico sendo possível elevar a produtividade e rendimento.

Operações de colheita florestal foram intensificadas a partir da década de 90, com a evolução do maquinário empregado nesta atividade. Porém, esta modernização tem proporcionado maior aceleração do processo de degradação do solo, devido ao aumento do tráfego de máquinas, favorecendo o desequilíbrio das propriedades do solo, ocasionando principalmente a compactação (DIAS JÚNIOR, 1996).

As máquinas utilizadas na colheita, de maneira geral são muito pesadas e, quando combinadas com o manuseio das toras, exercem grandes pressões no solo, que causam danos em diferentes profundidades. O tráfego consecutivo em uma mesma área provoca prejuízos no solo, pois durante a colheita uma máquina trafega por várias vezes na mesma linha, visto que estudos comprovam que desde a primeira passada são observados danos na estrutura do solo (FERNANDES; ORLANÇO; LANÇAS, 1997; CUNHA et al., 2009).

O solo é a base para sustentação das plantas, quando afetado compromete o desenvolvimento das mesmas, causando prejuízos futuros. Desta maneira existem parâmetros físicos estruturais que determinam o nível de compactação de um solo, sendo estes principalmente: densidade, porosidade e resistência à penetração.

A compactação do solo pode ser causada por fenômenos de causas naturais ou artificiais (MOLINA JUNIOR, 2017), tendo como resultado a agregação de partículas que influencia nas características naturais do solo, como maior incremento na densidade, redução dos macroporos, menor infiltração de água, fatores estes que podem interferir no desenvolvimento das plantas, como no impedimento do crescimento das raízes, impossibilitando-as de realizar seu processo de absorção de água e nutrientes com eficiência (PAYÁ, 2016).

Em função dos prejuízos causados no solo durante a colheita, é de grande valia estudar as modificações na estrutura do mesmo, que é tão importante para sustentação da biodiversidade do sistema.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas em operações de colheita de *Pinus taeda*.

### 2.2 Objetivos específicos

- Demarcar o experimento durante a colheita florestal de acordo com os diferentes números de passadas;
- Medir a estrutura através da densidade e porosidade do solo;
- Medir a resistência do solo à penetração;
- Medir a dinâmica da água através da condutividade hidráulica saturada.

### 3 JUSTIFICATIVA

A colheita florestal, por ser uma atividade com elevado potencial de alterar a paisagem, necessita de estudos adequados sobre seus sistemas de colheitas e equipamentos disponíveis para realizar esta atividade, a fim de racionalizar a utilização de recursos. Esse aperfeiçoamento na utilização dos recursos vai garantir melhorias no desempenho das empresas, visto que a maior demanda por produtos de base florestal tem desencadeado desenvolvimento do setor florestal.

Com essa maior necessidade de produção florestal para atender a demanda, houve modernização do maquinário, que se tornou mais eficiente, entretanto mais pesado, fazendo maior pressão no solo, modificando principalmente os atributos físicos referentes à estrutura do mesmo.

Sabendo que o solo é a base para o desenvolvimento de todas as plantas, existem algumas maneiras de degradação do mesmo, que pode ocorrer de forma natural pela própria natureza, ou de forma antrópica, quando o homem intervém de maneira excessiva as perdas maiores.

Nesse sentido, é de grande valia estudar as formas em que os solos são modificados quando sofrem ações de força mecânica no campo, visando evitar danos severos que prejudiquem o desenvolvimento das plantas, e possibilitar empregar técnicas tanto na condução do solo, como também no planejamento da colheita florestal, que visem minimizar prejuízos da colheita.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Setor Florestal

O setor de florestas plantadas vem contribuindo para a geração de produtos, tributos, empregos e renda, sendo uma área de grande importância no fornecimento de matéria-prima para o crescimento da indústria nacional de base florestal, além de colaborar com a preservação ambiental (ABRAF, 2012). Atualmente empresas do ramo optam cada vez mais por plantios com espécies exóticas de rápido crescimento como uma alternativa de investimento. Várias espécies são cultivadas para diferentes propósitos, visando atender à demanda de produtos florestais, que antes eram obtidos a partir de madeira proveniente de florestas nativas (WOLFF II, 2012).

Conforme a ABRAF (2013), o cultivo de *Pinus sp.* ocupa cerca de 1.562.782 hectares (ha) do território brasileiro tendo sua maior concentração na Região Sul do país (84,7%) graças às condições edafoclimáticas e a localização dos principais pátios que processam esse tipo de madeira. O estado que possui a maior área ocupada por essa espécie é o Paraná, com 619.731 ha (39,7% nacional), seguido de Santa Catarina, com 34,5% da área total. A espécie ainda traz características interessantes em seu manejo, plantio e utilização da madeira, podendo se destacar a resistência à geadas, moderado crescimento, rusticidade e várias formas de utilização da madeira (SCHIMIZU, 2010).

### 2.3 Colheita Florestal

A colheita florestal é um conjunto de atividades realizadas em uma área de floresta, visando o preparo e a extração de madeira até o local em que será utilizada, com a finalidade de transformá-la no produto final. Este processo envolve ainda o planejamento das operações, a medição, o recebimento no pátio da indústria e a comercialização da madeira (MACHADO, 2008).

Na atividade florestal no Brasil, o pouco maquinário utilizado era oriundo na agricultura, visto que até a década de 40 praticamente não havia emprego de máquinas nas operações de colheita florestal, o corte era realizado de forma rudimentar com uso de machado, foices e serras. A extração também se baseava em métodos rudimentares utilizando o trabalho braçal e animal (MACHADO, 2008).

Na década de 60 a atividade florestal que era de caráter extrativista passou a se tornar atividade comercial e com isso começou a ganhar incentivos fiscais do governo. A partir desse momento, o setor teve maior crescimento e muitas empresas começaram a acreditar no desenvolvimento, onde começou maiores investimentos em tecnologia para a área (LOPES, 2007).

Na década de 70 houve o início da modernização na colheita florestal quando a indústria nacional começou a produzir máquinas de porte leve e médio. Nesse mesmo momento começou a surgir motosserras profissionais, e tratores agrícolas com pinça hidráulica e autocarregáveis. Em 1994 com a abertura das importações, as empresas iniciaram de forma mais intensiva a mecanização da colheita florestal, a fim de obter maior eficiência e diminuição dos custos de produção, além de executar o trabalho de forma mais ergonômica (MACHADO et al., 2008).

A direção do corte é um ponto muito importante a ser avaliado no planejamento, pois as faixas de derrubada já configuram por onde será realizada a extração da madeira. Este planejamento adequado reduz o trabalho no campo e problemas causados no solo devido às consecutivas passadas no maquinário em um mesmo local (BROWN e DINIZ, 2017).

#### 4.2 Sistema de colheita florestal

Existem vários sistemas de colheita e processamento de madeira no campo, conforme a espécie, a idade do povoamento, a finalidade do produto e as condições gerais das áreas de colheita. Para cada grupo de condições específicas, certamente existe um sistema mais indicado a ser selecionado para que se proceda à colheita da madeira (MACHADO, 2008; SILVA et al., 2003)

Segundo o sistema de classificação da FAO (1978), citado por Malinovski (1998) e Machado et al. (2014) os sistemas de colheita podem ser classificados quanto ao comprimento das toras e à forma como são extraídos ao local de processamento.

Dessa forma existem dois sistemas mais usuais, no sistema de toras curtas (*Cut-to-length*) a árvore toda é processada dentro do talhão, onde as toras devem apresentar no máximo 6,5 metros de comprimento. O modal mecanizado mais utilizando nesse sistema é composto, basicamente, por duas máquinas: *Harvester* e *Forwarder*, onde a primeira realiza o corte e processamento das árvores, enquanto a segunda realiza a extração da madeira na forma de baldeio (figura 1).

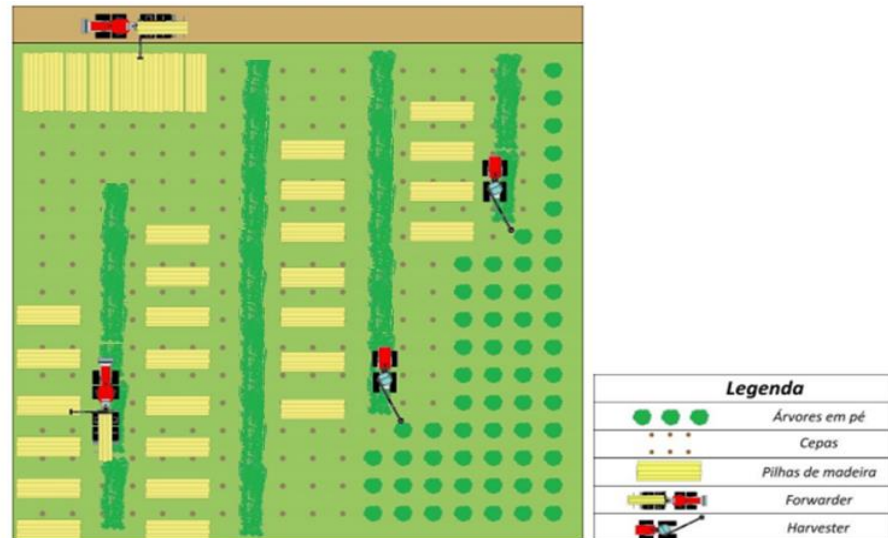


Figura 1- Sistemas de toras curtas (cut to length).  
Fonte: Jucá, 2016.

Já no sistema de toras longas (*Tree-length*) a árvore colhida é desganhada, destopada dentro do talhão e transportada em forma de fuste com mais de 6,5 metros de comprimento, o modal mecanizado mais utilizado nesse sistema é composto pelas máquinas: *Feller-buncher*, *Skidder* e Processador, onde a primeira derruba as árvores, a segunda realiza a extração na forma de arraste e a última proporciona o processamento da madeira na margem do talhão ou pátio intermediário (figura 2).

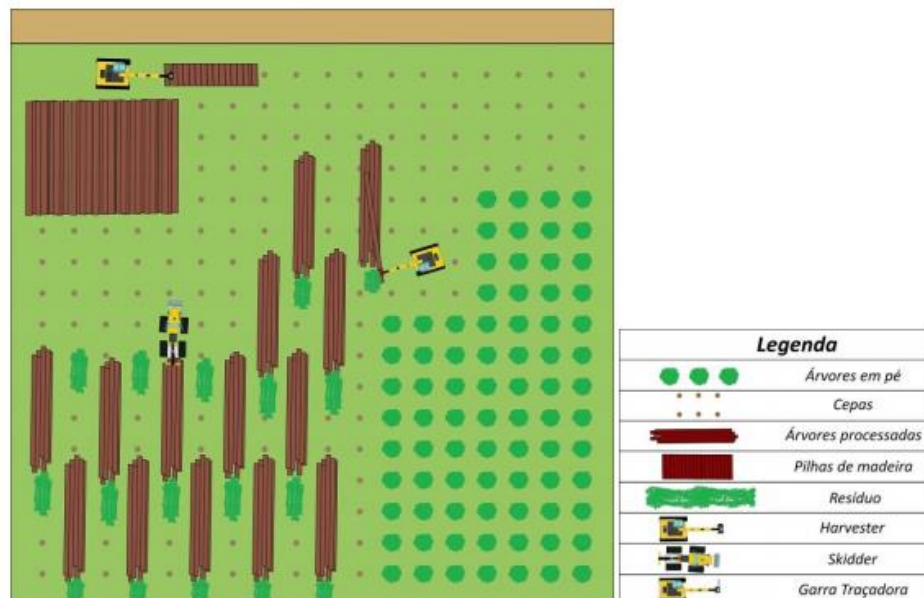


Figura 2- Sistemas de árvores longas (*Tree-length*).  
Fonte: Jucá, 2016.



### 4.3 Compactação do solo

Solos florestais possuem baixa capacidade de carga pela menor densidade encontrada, o que acarreta na compactação do solo. A compactação é definida como o aumento da densidade do solo, ocorre quando a carga aplicada sobre um determinado solo causa a aproximação das partículas (POLTORAK; LABELLE; JAEGER, 2018), com a ação mecânica imposta ao solo ocorre redução de seu índice de porosidade, a qual pode ser definida como a relação entre o volume de espaços vazios e o volume de sólidos. Trata-se de uma tensão aplicada sobre o solo resultante de mudanças em termos de incremento da densidade, redução do espaço poroso, infiltração e movimento lento da água e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes (CAMARGO, 1983).

O termo compactação do solo está relacionado à redução do volume de poros não saturados quando certa pressão externa é aplicada, geralmente causado pelo tráfego de máquinas, implementos e pisoteio de animal (LIMA, 2004). Como demonstrado no esquema da figura 3.

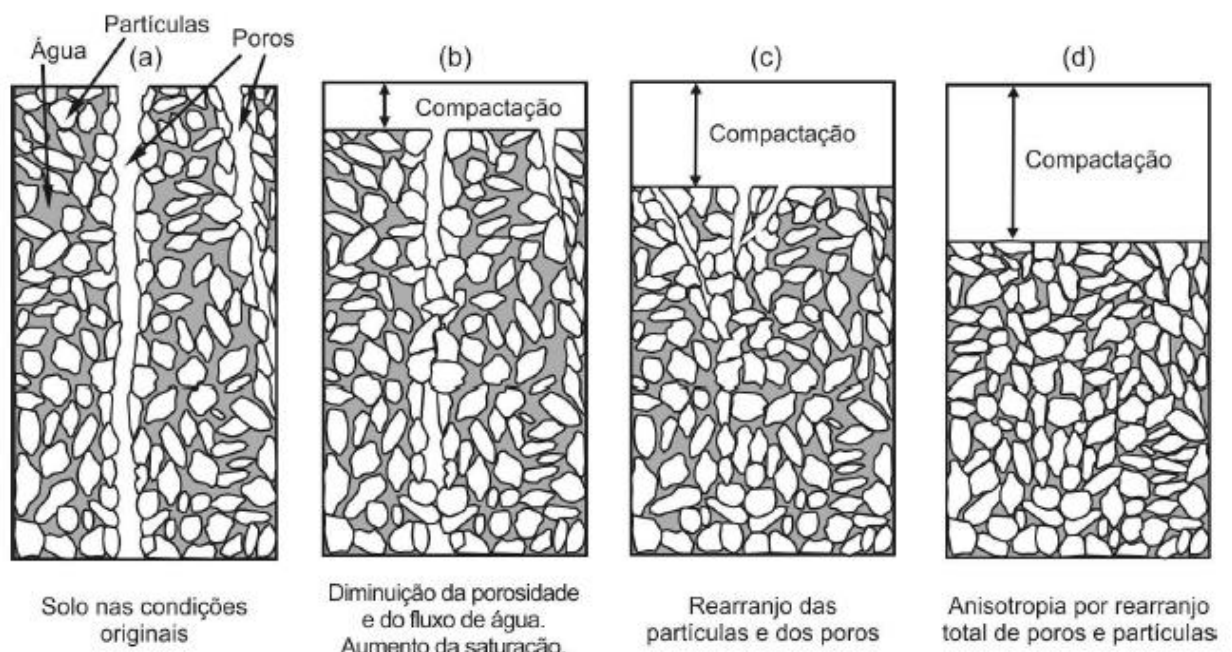


Figura 3 -Esquema representando o solo em condições de compactação.  
Fonte: MOLINA JUNIOR, 2017 adaptado de HORN, 2003.

De acordo com Figueiredo; Dias Junior; Ferreira (2000), a compactação pode causar diversos efeitos, os quais podem ser verificados tanto no solo e nas plantas. Os principais efeitos negativos encontrados no solo são: aparecimento de trincas nos sulcos formados pelos rodados da máquina, zonas endurecidas, empoçamento de água, erosão hídrica, longa permanência de resíduos parcialmente decompostos após sua incorporação e necessidade de maior potência das

máquinas no preparo de solo. Já para as plantas, destacam-se: baixa emergência e variação no tamanho das plantas, sistema radicular raso e horizontal, raízes tortuosas ou com má formação.

A compactação influencia diretamente na condutividade hidráulica e na infiltração de água no solo, pois acarreta modificação dos espaços entre as partículas do solo (REICHERT et al., 2007). Segundo Silveira (2001) solos compactados dificultam o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, prejudicando a mobilidade dos nutrientes no solo e reduzindo a infiltração de água e das trocas gasosas entre a atmosfera e o solo.

O desenvolvimento das plantas é influenciado pela compactação, quando o diâmetro da raiz é superior ao diâmetro do poro é sinal que está ocorrendo o impedimento de expansão radicular, o crescimento é bloqueado por encontrar uma resistência mecânica, quando este bloqueio não é rompido, ocorre o engrossamento radicular e a raiz tende a permanecer entre as camadas superficiais do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

A profundidade da compactação em áreas florestais pode ser maior que em áreas agrícolas, muitas vezes isso acontece pelo fato do maquinário ser mais pesado, pela grande intensidade de tráfego de máquinas e pelas condições do solo onde as máquinas estão circulando, principalmente pela alta possibilidade do solo estar com alta umidade, devido o sombreamento de árvores e grande acúmulo de resíduos vegetais e matéria orgânica no solo (SUZUKI et al., 2007; REICHERT et al., 2007; REINERT et al., 2007).

#### 4.3.1 Fatores que influenciam na compactação

Um dos principais fatores que devem ser observados quando se busca avaliar a compactação de um solo é a umidade, pois a água atua como lubrificante entre as partículas favorecendo a diminuição do atrito, com isso ocorre à reorganização das partículas ocasionando a compactação. Desta maneira, solo com menor umidade tendem a ter maior resistência com relação às pressões aplicadas sobre o mesmo (DIAS JUNIOR, 1994).

Segundo Molina Junior (2017) quando o solo está com baixa umidade, apresenta maior resistência, pois, com a hidratação das partículas de solo ocorre a lubrificação permitindo o rearranjo da estrutura diminuindo os espaços vazios. Já na umidade ótima do solo, como demonstrado no ponto máximo da curva na figura 4, o material não estará saturado, e os capilares são interrompidos, o que dificultará a saída do ar encontrado nos espaços vazios.

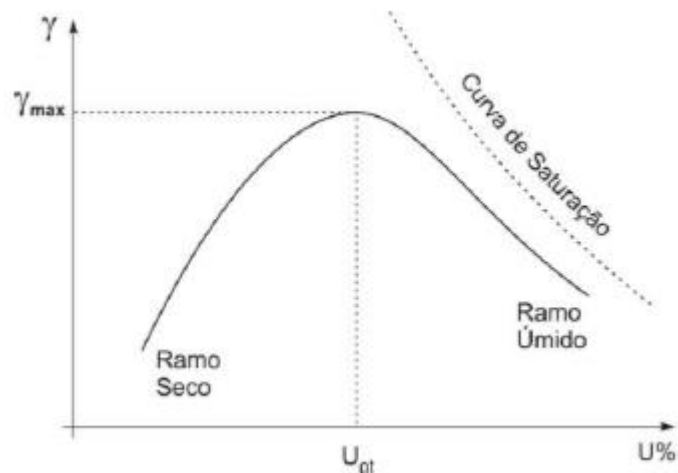


Figura 4-Curva de compactação de um solo sofrendo esforço mecânico em função da da umidade.  
Fonte: Molina Junior, 2017.

Grohmann e Queiroz Neto (1996) demonstraram em seu trabalho que o teor de umidade inicial é o fator mais importante para determinação da compactação, pois com o aumento da umidade um solo com a mesma pressão tende a apresentar massa específica aparente maior.

As propriedades físicas do solo devem ser consideradas quando se diz respeito à compactação do solo, a textura é determinada pela quantidade de partículas de diferentes tamanhos no solo (REINERT e REICHERT, 2006), as dimensões destas partículas podem ser definidas conforme a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do solo, determinando que existem “quatro classes de tamanho de partículas para definir a textura dos solos, sendo estas: areia grossa – 2 a 0,2 mm; Areia fina – 0,2 a 0,05 mm; Silte – 0,05 a 0,002 mm; Argila – menor do que 0,002 mm.”

O Sistema Brasileiro de Classificação do solo determina alguns grupamentos texturais a serem considerados para classificar o solo, que variam desde textura arenosa, média, argilosa, muito argilosa e siltosa. De maneira geral, solos argilosos tendem a ser mais propícios à compactação quando comparados com solos arenosos, por possuírem maior quantidade de agregados menores, favorecendo para a menor redução de volume de solos argilosos (GROHMANN E QUEIROZ NETO, 1996), Como apresentado na figura 5, que demonstra três tipos de solo com diferentes granulometrias.

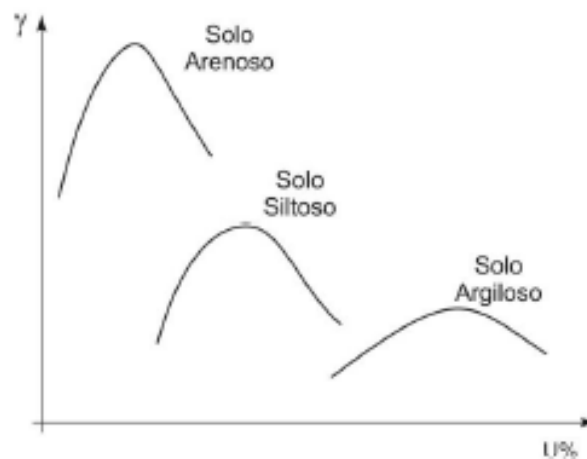


Figura 5- Comportamento de solos com diferentes granulometrias quanto à susceptibilidade à compactação função da umidade e pressão aplicada.

Fonte: Adaptado de MOLINA JUNIOR, 2017.

A avaliação da textura pode ser realizada em laboratório ou no campo, e algumas propriedades do solo podem ser influenciadas pelo tamanho das partículas, como porosidade do solo, retenção de água e resistência a compactação (REINERT e REICHERT, 2006).

O tamanho, peso e quantidade de carga transportada pelas máquinas durante a colheita delimitam a pressão exercida no solo, algumas especificações da máquina como tipo de rodado e pressão de inflação dos pneus, o conhecimento dessas informações é de grande importância para evitar ou minimizar a compactação (REICHERT, SUZUKI e REINERT, 2007).

Relacionado com as características do maquinário empregado, a intensidade implica em problemas, pois o tráfego excessivo sem o controle das condições do solo é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, pelas consecutivas passadas como pelo tráfego do trator sobre o solo (BELTRAME e TAYLOR, 1980), visto que estudos comprovam que os efeitos do tráfego de tratores na primeira passada causam os maiores efeitos de compactação na camada de 0-0,20 cm (CUNHA et al., 2009). Visto que, máquinas que realizam várias operações de uma só vez e evitam maiores intensidades de tráfego são bem vistas no que diz respeito à conservação do solo (REICHERT, SUZUKI e REINERT, 2007).

Segundo Figueiredo; Dias Junior; Ferreira (2000), quanto maior a intensidade de passadas das máquinas, maior é o nível da compactação em relação a profundidade, devido ao tráfego diversas vezes em uma única linha durante o corte e baldeio da madeira, acarretando na compactação do solo, além de provocar processo de erosão.

A área florestal possui um grande aliado na minimização da compactação do solo, a presença de matéria orgânica e manejo da biomassa residual que se encontra na superfície do

solo, além de contribuir com a atividade biológica e a disponibilidade de nutriente para as plantas (BRAIDA, 2004). A matéria orgânica do solo (MOS) tem influência na retenção de água, sendo solos com maior teor de matéria orgânica possuem maior capacidade de retenção de água, o que favorece a reorganização das partículas do solo, estima-se que 1% em peso de matéria orgânica aumente em torno de 10% da capacidade total de retenção de água (MOLINA JUNIOR, 2017).

#### 4.4 Atributos físicos do solo

Algumas propriedades físicas do solo têm estreita relação com a compactação, especialmente aquelas que proporcionam maior relação entre massa e volume, visto que a compactação é o aumento da massa relacionado com a redução do espaço poroso do solo (REICHERT, SUZUKI e REINERT, 2007).

Sabe-se que o solo é um sistema composto por fase sólida, líquida e gasosa, onde a fase líquida e gasosa corresponde à parte porosa do solo. Os poros são definidos como cavidades de diferentes tamanhos, que podem ser determinados pelo arranjo, forma e tamanho das partículas do solo (PREVEDELLO, 1996). A porosidade é a parte do solo ocupada por água ou ar, sendo denominado como o espaço onde ocorrem processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1970).

A porosidade pode ser classificada em macroporosidade e microporosidade, os macroporos são maiores e permitem a rápida redistribuição de água, a fim de realizar a infiltração e areação do solo, já a microporosidade serve para reter e armazenar a água no solo (MOZART, 2010).

A porosidade é um atributo que depende do teor de matéria orgânica encontrada no solo. Assim pode-se relacionar o acúmulo de matéria orgânica com a redução da densidade do solo, devido à redução de pontos de contato de partículas sólidas do solo e aumento da porosidade (BRAIDA et al., 2011). Segundo Azevedo e Dalmolin (2003) Citado por Szymczak (2013) quando ocorre decréscimo do teor de matéria orgânica em profundidade, ocorre maior nível de empacotamento das partículas, causado assim uma redução na porosidade total do solo devido ao aumento da profundidade.

A densidade do solo é uma das principais características físicas na avaliação de um solo em relação à compactação do mesmo, por ser pouco dependente de outros fatores (REICHERT et al., 2007). A densidade do solo é a razão entre a massa de solo seco em estufa, representada em (kg ou Mg) e seu respectivo volume total (V), ou seja, é volume do solo contendo os espaços

porosos ocupados pela água ( $V_a$ ) e pelo ar ( $V_{ar}$ ) é denominada densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$  ou  $\text{Mg m}^{-3}$ ). É considerada um indicador da qualidade física de um solo e é utilizada para determinação de outras propriedades do mesmo (REINERT et al., 2006).

As alterações dos valores de densidade do solo são resultantes de ações naturais de difícil avaliação, como por exemplo, a eluviação de argila, ou de ações artificiais, movido por forças mecânicas no solo, pelo tráfego de máquinas e implementos, ocasionado pressão sobre o solo (SECCO et al., 2004).

A partir da condutividade hidráulica do solo também podemos avaliar a compactação do solo. De acordo com Millar (1978), a determinação da condutividade hidráulica pelo método do permeâmetro de carga constante é recomendada quando se quer estudar a influência da variabilidade do solo e suas características como textura, estrutura, compactação, salinidade, qualidade de água, dentre outros no movimento de água em solo saturado.

A condutividade é estimada pela percolação da água através de uma amostra indeformada e saturada em um cilindro sobre o qual é aplicada uma carga de água constante, a partir disso podemos avaliar a intensidade do deslocamento da água no solo.

Outro indicativo de compactação é a resistência mecânica do solo a penetração (RP), a qual demonstra a resistência física do solo quando a movimentação de raízes em desenvolvimento entre o perfil do solo. O estudo da RP é de grande importância, pois está relacionada diretamente no desenvolvimento das raízes (LIMA et al., 2010).

A avaliação da resistência a penetração é um método muito utilizado para indicativo da compactação, devido a sua agilidade e facilidade em sua determinação (TORMENA, 1996). Essa avaliação pode ser realizada através de penetrógrafos ou penetrômetros (REINERT et al., 2007).

A resistência está ligada diretamente a diversos atributos como a densidade do solo, porosidade e quantidade de água no solo, esses atributos possibilitam indicar o grau de compactação que o solo se encontra. Portanto a resistência é considerada uma das propriedades de grande importância no estudo do manejo e da qualidade física do solo, o qual influencia diretamente na escolha do sistema de preparo mais adequado para o crescimento e desenvolvimento das culturas (RIBON e TAVARES FILHO, 2008).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado nas áreas operacionais de colheita de madeira da empresa Araupel S.A, que está localizada no município de Quedas do Iguaçu, Paraná, inserido no domínio do terceiro planalto paranaense, sob as coordenadas 52°54'39'' W e 25° 27'22'' S, apresentando altitude média de 509 metros, como apresentado na figura 6 (IBGE, 2010).



Figura 6-Localização do Município de Quedas do Iguaçu, PR.  
Fonte: Adaptado IBGE, 2012.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Quedas do Iguaçu é do tipo Cfa - Clima subtropical, temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (IAPAR, 2009).

### 5.2 Caracterização da área de estudo

O solo da área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico, sendo considerado um solo profundo, com boa drenagem e homogêneo (EMBRAPA, 2006). A área

estudada era povoada por floresta de *araucária* angustifolia até o ano de 2006. No início do ano de 2007 foi implantado um povoamento de plantio de *Pinus Taeda* L. No povoamento houve apenas uma desrama no ano de 2010, e desde então não houve mais manejo da área.

**Tabela 1-** Características do povoamento florestal

Item	Especificações
Ocupação do solo anterior	Povoamento de <i>Araucaria angustifolia</i>
Preparo do solo	Realizado
Espécie	<i>Pinus taeda</i> L.
Idade do corte	11
Espaçamento (m)	3x3
Número de árvores/ha (Nº/ha <sup>-1</sup> )	1 666
Área do talhão estudada (ha <sup>-1</sup> )	0,6
DAP médio (cm)	19,3
Altura média (m)	21

Tabela 1: Descrição do povoamento estudado

### 5.3 Colheita florestal

O sistema de colheita de madeira utilizado pela empresa é de toras curtas “*Cut to leangh*”, caracterizado pelo processamento (Corte, desganhamento, destopamento e traçamento) da árvore no local de derrubada e extração na forma de baldeio. No processamento da colheita foi utilizado um trator florestal *Harvester*, já na operação de baldeio da madeira foi utilizado um trator florestal *Forwarder* representado na figura 7.



Figura 7- Maquinas utilizadas na colheita florestal. (A) *Harvester*; (B) *Forwarder*.  
Fonte: O autor, 2018.

O *Forwarder* é responsável pelo baldeio da madeira do interior até a margem do talhão, percorrendo o mesmo ramal formado pelo *Harvester*, porém vai realizar mais de uma passada ao longo da trilha de extração.



O *Harvester* é da marca Caterpillar modelo 315, com peso de operação de 28 toneladas, equipado com um cabeçote log Max 5000c e possui rodados de esteira. O *Forwarder* também da marca Caterpillar modelos 564 6x6, com peso de operação de 16 toneladas, e com rodado de pneu.

#### 5.4 Procedimento amostral

O procedimento de amostragem do solo foi realizado sobre a linha de passagem das máquinas de corte e extração da madeira, de acordo com os seguintes tratamentos:

- T0- Sem tráfego de máquinas com a floresta em pé (Testemunha);
- T1-1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder* (1 HV + 1 FW);
- T2-1 passada do *Harvester* + 3 passadas do *Forwarder* (1 HV + 3 FW);
- T3-1 passada do *Harvester* + 6 passadas do *Forwarder* (1 HV + 6 FW);
- T4-1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder* (1 HV + 8 FW).

Neste estudo, uma passada do *Forwarder* foi considerada somatória de uma passada vazia e uma carregada, correspondendo ao ciclo da máquina. Portanto, 1 passada do HV + 1 passadas do FW correspondeu a uma passada do *Harvester* e duas passadas de *Forwarder*, sendo uma veze vazio e uma carregada, e assim sucessivamente. Para cada tratamento, foram realizadas quatro repetições, distribuídas nas linhas de tráfego das maquinas (figura 8), no total foram retiradas 160 amostras, sendo coletadas 32 amostras por tratamento.

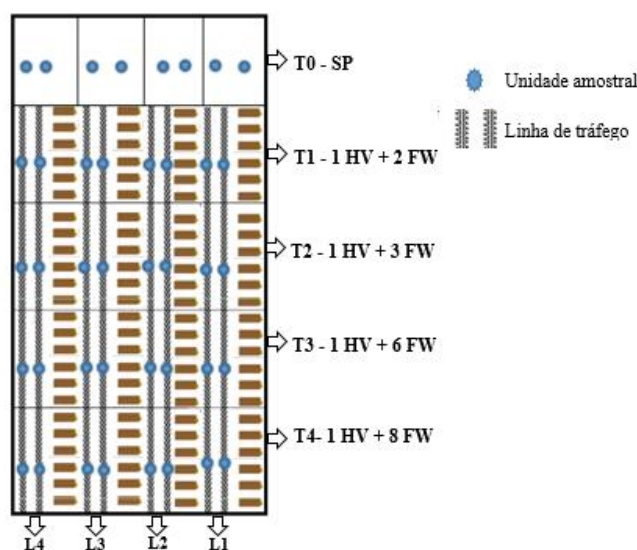


Figura 8- Esquema da coleta de amostras do solo na área experimental.  
Fonte: O autor, 2018.

As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, em cilindros volumétricos e com auxílio de um extrator para retirada da amostra (figura 9), todos os anéis utilizados serão pesados antes da coleta.

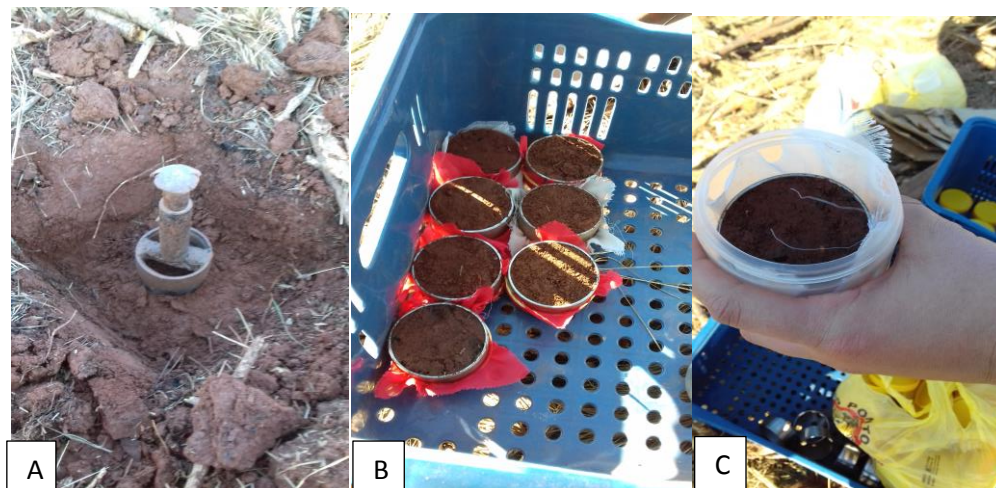


Figura 9 – Detalhes da coleta das amostras. (A) Extrator na retira da amostra; (B) Amostras de solo; (C) Amostra alocada em pote plástico para o transporte.

Fonte: O autor, 2018.

## 5.5 Parâmetros físicos do solo

A compactação foi avaliada com base nos seguintes parâmetros físicos do solo: Densidade ( $D_s$ ), Porosidade total ( $P_t$ ), Condutividade Hidráulica Saturada e Resistência do solo à penetração ( $R_P$ ).

### 5.5.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da densímetro proposto pela EMBRAPA (2017), utilizando amostras de solo coletadas nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade com auxílio do trado holandês. As amostras foram dispersas através do agitador horizontal com 150 rpm durante o período de 4 horas, utilizando vidros de 200ml contendo 50g de solo, 10 ml de NaOH 6%, uma esfera de nylon e água destilada até a borda do vidro. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

### 5.5.2 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo, as amostras de solo foram pesadas para obtenção do peso úmido, e secas em estufa a 105 °C para obter então peso seco, e logo após foi aplicado a seguinte expressão (EMBRAPA, 2017):

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad [2]$$

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

### 5.5.3 Porosidade do solo

A determinação da porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI), as amostras coletadas foram acondicionadas em uma bacia com água onde permaneceram até a saturação total, após este processo as amostras foram pesadas e levadas a mesa de tensão, onde permaneceram por 48 horas (figura 10).

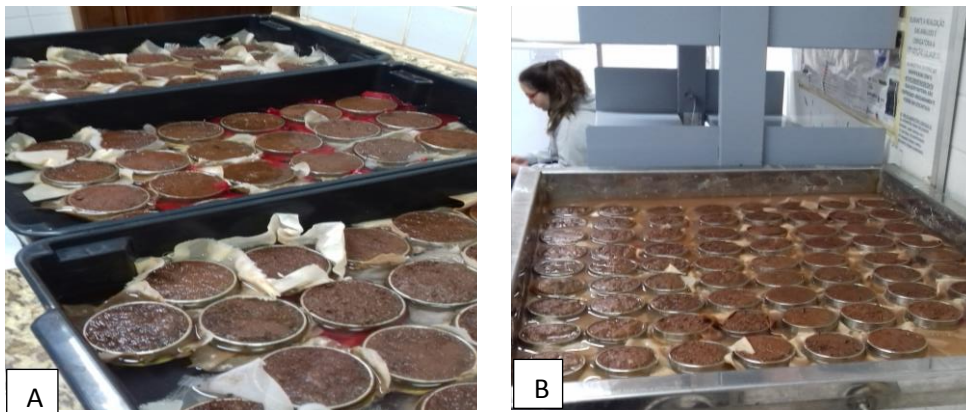


Figura 10– (A) amostras em processo de saturação; (B) amostras na mesa de tensão.  
Fonte: O autor, 2018.

Após este procedimento as amostras foram pesadas novamente e em seguida levadas para estufa a 105 °C, onde ficaram por 48 horas e foram pesadas novamente. E assim, com os valores de peso das amostras e densidade do solo, foi possível realizar os cálculos de porosidade total, microporosidade e macroporosidade por meio das seguintes equações:

$$P_t = \frac{M_{ssa} - M_{ss}}{M_{ss}} \times D_s \quad [3]$$

$$MI = \frac{M_{st} - M_{ss}}{M_{ss}} \times D_s \quad [4]$$

$$MA = PT - MI \quad [5]$$

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 ( $Mg\ m^{-3}$ );  $MI$  =

Macroporosidade ( $m^{-3} m^{-3}$ );  $M_{st}$  = 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 ( $m^{-3} m^{-3}$ ).

#### 5.5.4 Condutividade Hidráulica Saturada

A condutividade Hidráulica é a relação entre a carga e a velocidade com que a água se movimenta através do solo. Para avaliação foi utilizado à metodologia proposta pelo manual de métodos de análise de solo (Embrapa, 2017). O procedimento se dá pela utilização das amostras coletadas em cilíndrico metálico, com auxílio de um Permeâmetro (figura 11).



Figura 11- Permeâmetro de carga constante.  
Fonte. O autor, 2018.

A partir da percolação da água pela amostra indeformada e satura contida em um cilindro, a água é recolhida a cada 1 minutos em um copo plástico e seu volume é medido, esse procedimento é repetido por mais 4 vezes. A partir desse processo fez-se então a relação do volume percolada utilizado a seguinte expressão:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H \times t} \quad [6]$$

Em que:  $K$  – condutividade hidráulica, em  $m h^{-1}$ .  $Q$  – Volume do percolado, em ml, ou seja, o valor da última leitura quando não há variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação.  $L$  – altura do bloco do solo, em cm.  $H$  – altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm.  $A$  – área do cilindro, em  $cm^2$ .  $t$  – tempo de percolação, em horas.

#### 5.5.5 Resistência do solo à penetração



Para avaliar a resistência do solo a penetração, foi utilizado um penetrômetro eletrônico digital da marca Falker, com haste de 60 cm de comprimento, e diâmetro do cone de 12,83 cm. Sua leitura é feita de cm em cm, com resolução configurável.

As coletas de dados da resistência do solo a penetração foram realizadas próxima aos pontos onde foram coletadas as amostras do solo (figura 12), sendo realizado 6 pontos sobre a linha de tráfego, utilizando a média das leituras de 0-10,10-20, 20-30, 30-40 e 40 a 50 cm. As leituras foram realizadas de acordo com os tratamentos estudados.



Figura 12 – Medição de Resistencia do solo a penetração.  
Fonte: O autor, 2018.

No andamento da avaliação da RP, foram realizadas coletas de amostras de solo com trato holandês para determinar a umidade gravimétrica, as coletas foram realizadas ao lado dos pontos de RP, nas profundidades de 0-10,10-20,20-30,30-40 e 40-50cm. Após as amostras coletadas foram levadas ao laboratório para determinar a umidade gravimétrica  $U_g$  conforme a metodologia da EMBRAPA (2017).

## 5.6 Análise estatística

O experimento caracterizou-se no delineamento inteiramente casualizado DIC, os dados obtidos nas avaliações dos parâmetros físicos do solo foram submetidos à análise de variância, através do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2014), onde aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Caracterização do solo da área

O solo da área estuda neste trabalho apresentou uma quantidade média de areia total de 79,12 kg kg<sup>-1</sup>, com 212,80 kg kg<sup>-1</sup> de silte e 605,32 kg kg<sup>-1</sup> de argila. É possível observar uma diminuição na quantidade de areia total e aumento da quantidade de argila em profundidade (Tabela 2).

**Tabela 2-** Granulometria média e umidade gravimétrica nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Prof.	Granulometria média (g kg <sup>1</sup> )			
	Areia T.	Silte	Argila	Ug (g/g)
<b>0-10</b>	84,76	216,66	581,66	22,08
<b>10-20</b>	79,06	204,16	610,83	20,52
<b>20-30</b>	81,65	218,33	595,15	20,22
<b>30-40</b>	77,65	208,22	613,00	21,12
<b>40-50</b>	71,81	216,66	626,00	19,10
<b>Média</b>	79,12	212,80	605,32	18,35

Prof.: Profundidade; Ug: Umidade gravimétrica.

### 6.2 Densidade do solo

Os valores de densidade do solo nos tratamentos estudados estão apresentados na tabela 3.

**Tabela 3-** Valores médios da densidade do solo (Mg m<sup>3</sup>) nas diferentes profundidades de do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Tratamento	Densidade do solo (Mg m <sup>3</sup> )					Média	CV%
	Profundidade (cm)						
	0-10	10-20	20-30	30-40			
<b>T0</b>	0,86 A b	0,90 A a	0,95 A a	0,92A a	0,91	6,09	
<b>T1</b>	1,07 B a	1,06 B a	1,01 B a	1,01 B a	1,04	5,04	
<b>T2</b>	1,02 B a	1,03 B a	1,04 B a	1,04 B a	1,04	2,98	
<b>T3</b>	1,18 C a	1,16 C a	1,15 C a	1,15 C a	1,16	4,96	
<b>T4</b>	1,24 C b	1,22 C b	1,19 C b	1,16 C a	1,20	4,17	

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. CV: coeficiente de variação.

Como podemos observar, houve um acréscimo de incremento da Ds conforme o aumento da intensidade de tráfego nas camadas, segundo Figueiredo (2001) a forma de condução de uma área para reflorestamento, pode acarretar em prejuízos solo com aumento nos níveis de compactação. Ocorreu diferença estatística entre os tratamentos, porém em relação as

profundidades de cada tratamento, somente o T0 e T4 se diferiu dos demais tratamentos em todas as camadas avaliadas, T1, T2 e T3 foram estatisticamente iguais nas diferentes profundidades.

O incremento máximo de densidade do solo foi 44% observado na profundidade de 0-10 cm entre T0 (0,86 Mg m<sup>-3</sup>) e T4 (1,24 Mg m<sup>-3</sup>), já na camada de 30-40 cm essa diferença foi de 26% (T0 0,92 Mg m<sup>-3</sup>; T4 1,16 Mg m<sup>-3</sup>), segundo Geist; hazard e Seidel (1989) um acréscimo entre 15 e 20% é considerado prejudicial, relacionado com o valor inicial da densidade do solo. Com os valores apresentados é possível observar que o 52% da compactação ocorre no T1 (1 passada do *harvester* e 2 do *Forwarder*), semelhante ao concluído por Seixas e Souza (2007), que observaram que 80% do compactação total do solo ocorre após as 5 primeiras passadas, o mesmo foi verificado por Oliveira e Lopes (2010) em seu estudo relacionado com a compactação do solo causada pela colheita de madeira com *Harvester* e *Forwarder*, houve incremento na densidade do solo devido ao tráfego de máquinas na colheita mais evidente nas camadas superficiais, com incremento acima de 15%, como demonstrado no presente estudo.

De acordo com Reynolds et al. (2007), para solos com textura argilosa o Ds deve apresentar valores entre 0,90 a 1,20 Mg m<sup>-3</sup>, já para Kiehl (1979) propõe que a densidade para solos argilosos esteja entre 1,0 a 1,20 Mg m<sup>-3</sup>. No entanto, os valores médios de Ds observados neste trabalho após o tráfego das máquinas ultrapassaram 1,20 Mg m<sup>3</sup> nas camadas iniciais dos tratamentos com maior número de passadas (T3 e T4), valor considerado crítico pelos pesquisadores citados.

### 6.3 Porosidade Total

Na tabela 4 estão apresentados os resultados da porosidade total nas diferentes condições estudadas.

**Tabela 4-** Valores de porosidade total do solo (m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Tratamento	Porosidade Total (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )					
	Profundidade (cm)				Média	CV%
0-10	10-20	20-30	30-40			
<b>T0</b>	0,73 B a	0,77 B a	0,74 B a	0,73 B a	0,74 A	7,16
<b>T1</b>	0,61 A a	0,61 A a	0,59 A a	0,57 A a	0,59 C	5,95
<b>T2</b>	0,65 A a	0,64 A a	0,64 A a	0,62 A a	0,64 B	4,97
<b>T3</b>	0,64 A a	0,63 A a	0,61 A a	0,59 A b	0,62 B	4,70
<b>T4</b>	0,66 A a	0,63 A a	0,62 A a	0,62 A a	0,63	6,45

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%.  
CV: coeficiente de variação.

T0 apresentou maior porosidade total, havendo redução de cerca de 15% da porosidade total nas diferentes profundidades com relação aos tratamentos com maior tráfego de máquinas. Estatisticamente apenas T0 apresentou diferenças, comparado os tratamentos sem passada das máquinas (T1; T2; T3; T4) houve menos de 5% de redução da porosidade total. O mesmo foi observado por Lopes et al., (2015), onde nos tratamentos com tráfego de *Harvester* e *Forwarder* não foram observadas diferenças significativas entre as profundidades.

De acordo Prevedello (1996) ocorre variação na porosidade total dos solos devido à textura, matéria orgânica e compactação, pode-se dizer que para solos arenosos, a porosidade total varia de 0,350 a 0,500 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, para solos argilosos, varia de 0,400 a 0,650 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>, enquanto que para solos francos a porosidade total é intermediária. Observando os valores de porosidade total encontrado neste trabalho, os resultados estão de acordo com os valores esperados para solos argilosos.

#### 6.4 Macroporosidade

Na tabela 5 está apresentado os dados referentes a macroporosidade. É possível verificar que, quando ocorre maior intensidade de tráfego das máquinas, os valores de macroporosidade decresceram principalmente na camada de 0-10, onde no T1 (1 passada do *Havester* + 1 passada do *Forwarder*), o valor médio foi de 0,119 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>, já no T4 onde ocorreu maior intensidade de tráfego, teve um valor médio de 0,154 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

**Tabela 5-** Valores de macroporosidade (m<sup>3</sup>m<sup>3</sup>) nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Tratamento	Macroporosidade m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					Média	CV%
	Profundidade (cm)						
	0-10	10-20	20-30	30-40			
<b>T0</b>	0,352 A a	0,355 A a	0,317 A a	0,307 A b	0,333 A	16,56	
<b>T1</b>	0,121 B a	0,120 C a	0,115 C a	0,120 A a	0,119 C	10,63	
<b>T2</b>	0,138 B a	0,147 B a	0,158 B a	0,143 A a	0,147 B	12,91	
<b>T3</b>	0,137 B a	0,138 B a	0,147 B a	0,143 A a	0,141 B	14,33	
<b>T4</b>	0,142 B a	0,172 B a	0,155 B a	0,146 A a	0,154 B	16,86	

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%.  
CV: coeficiente de variação.



O valor médio de macroporosidade observado no tratamento T0 foi de  $0,331 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , comparando esse valor com o valor médio do tratamento 4 onde foi obtido  $0,154 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , percebe-se que ocorreu uma redução de aproximadamente 53%.

De acordo com Szymcczak et al. (2014), relataram que as atividades de colheita causa redução da macroporosidade solo, principalmente nas camadas de 0-5 e 5-10 as quais sofreram maior compactação, com uma redução entre 60 a 50% em relação as condições iniciais do solo, sendo assim, o valor encontrado neste trabalho, foi próxima com o valor encontrado pelo autor acima.

Em todos os tratamentos e profundidade submetidos ao tráfego das máquinas, os valores de macroporosidade ficaram próximo dos valores mínimos considerados adequados para o desenvolvimento das plantas de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Reichert et al. 2007).

## 6.5 Microporosidade

Quanto à microporosidade, observamos na tabela 6 que T0 foi estatisticamente diferente dos demais tratamentos em todas as profundidades, na camada de 0-10, nota-se que com o aumento no número de passadas das máquinas, os valores aumentaram, para T0 o valor de microporosidade apresentado foi de  $0,387 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , já para T4, onde ocorreu maior intensidade de tráfego o valor apresentado foi de  $0,520 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resultado em um aumento de 13,43 % em relação as condições sem tráfego de máquinas. Quanto as diferentes profundidades em cada tratamento, não houve diferenças estatísticas para as profundidades, aceitando-se a hipótese H0, de que as profundidades são iguais.

**Tabela 6-** Valores de microporosidade nas diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Tratamento	Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )				Média	CV%
	Profundidade (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-40		
T0	0,387 B a	0,422 B a	0,427 B a	0,430 B a	0,416 B	6,72
T1	0,497 A a	0,491 A a	0,476 A a	0,456 A b	0,480 A	6,44
T2	0,512 A a	0,502 A a	0,482 A a	0,478 A a	0,494 A	5,48
T3	0,508 A a	0,496 A a	0,463 A b	0,453 A c	0,480 A	5,70
T4	0,520 A a	0,466 A b	0,475 A b	0,473 A b	0,483 A	6,60

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. CV: coeficiente de variação.

Verificando a camada de 10- 20 cm, nota-se que os valores de microporosidade não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, variando de  $0,4225 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  no T0 a  $0,4912 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para T1 e T3 resultando em um acréscimo de 16,5 % nos valores. Nas demais

camadas houve também um acréscimo semelhante, em torno de 12% nos tratamentos com maiores intensidades de tráfego (T3 e T4) em relação a T0. Mesmo não havendo diferença significativa nas demais camadas, nota-se que com o aumento de intensidade de passadas, há crescimento nos valores de microporosidade.

## 6.6 Condutividade Hidráulica Saturada

A tabela 7 apresenta os valores médios de condutividade hidráulica saturada, de acordo com as profundidades e tratamentos estudados. Podemos observar que apenas o tratamento T0 que mais diferenciou-se estatisticamente das demais, onde foram verificados os maiores valores de condutividade hidráulica encontrando os valores de 0,182 m/h e 0,155 m/h nas camadas 0-10 e 10-20, respectivamente, isso se dá pelo fato que não houve tráfego de máquinas nesse local.

**Tabela 7-** Valores médios de condutividade Hidráulica saturada (Ksat m/dia) em diferentes profundidades do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Tratamento	Condutividade (Ksat mm/h)				
	Profundidade (cm)				Cv (%)
	0-10	10-20	20-30	30-40	
<b>T0</b>	543,6 A a	480,6 A a	390,2 A b	365,8 A b	19,0
<b>T1</b>	106,1 B a	161,9 B a	174,2 B a	168,6 B a	26,0
<b>T2</b>	38,1 B a	118,3 B a	83,6 C b	133,5 B a	30,7
<b>T3</b>	36,0 B b	81,0 B b	106,8 B a	181,3 B a	39,8
<b>T4</b>	24,3 B b	66,9 B b	94,1 B b	123,0 B a	39,7

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. CV: coeficiente de variação.

Observando os resultados, podemos analisar que na camada de 0-10 dos tratamentos foi a que apresentou os menores valores de condutividade, entre 38,1 mm/h no tratamento com 1 passada do *Havester* + 3 passadas do *Forwarder* (T2) e de 24,3 mm/h no tratamento com uma 1 passada do *Havester* + 8 passadas do *Forwarder* (T4), resultando em uma diminuição de 33,3 % nos valores de condutividade. A condutividade hidráulica no T1 foi maior que no T4, devido o número de passadas, onde no primeiro ocorreu somente 1 passadas, e no segundo foram 8 passadas de *Forwarder*.

Em relação as profundida dos tratamentos onde ocorreu o tráfego de maquinas houve um aumento gradativo nos valores de condutividade, no T1 o valor de condutividade para a camada 0-10 foi de 106,1 mm/h chegando a um valor de 174,2 mm/h na camada de 20-30.

A redução de condutividade hidráulica quando comparado com as diferentes intensidades de passada de máquinas em relação a testemunha, é consequência da diminuição da porosidade total e da macroporosidade.

De acordo com Pereira (2015) o processo de compactação acarreta no aumento da densidade do solo e redução na porosidade total e, por conseguinte na condutividade hidráulica. Esse comportamento é justificado pelo fato de que ao aumentar a densidade do solo, o espaço poroso do solo passa a ser preenchido com partículas sólidas, ocupando justamente o espaço poroso no qual a água é movimentada.

A figura 13 ilustra gráficamente a classe de condutividade hídrica para solo saturada em que cada situação estudada se enquadra.

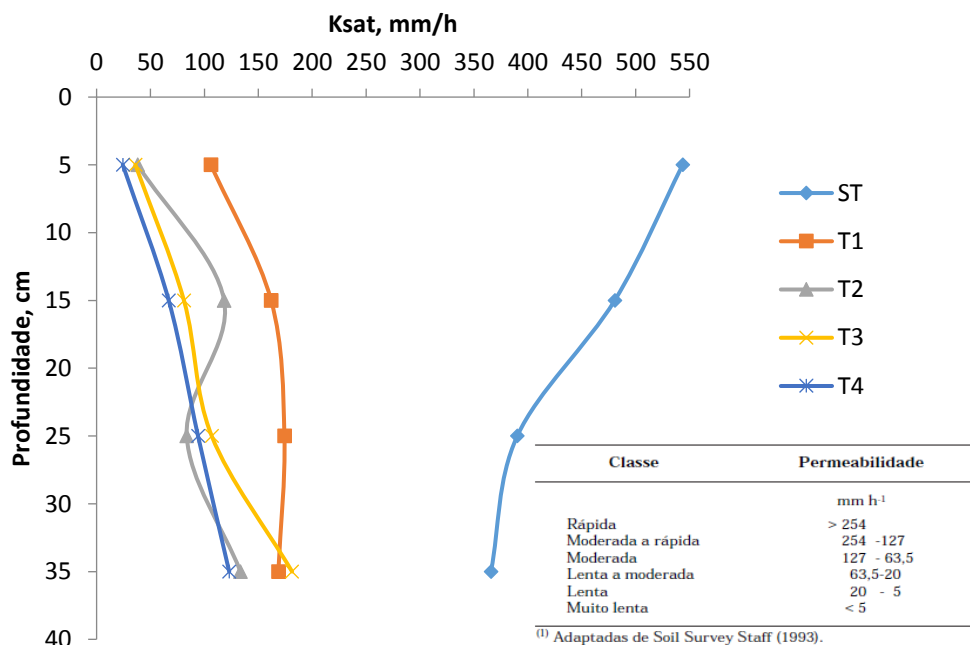


Figura 13- Gráfico de condutividade hidráulica saturada do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder* e classe de valores de condutividade Hidráulica saturada.

Podemos observar que os tratamentos estudados se classificam em três classes, moderadamente lenta, lenta e muito lenta, essas classes estão relacionadas com a percolação de água no solo. Na área onde não houve tráfego de máquinas todas as profundidades ficaram na classe moderadamente lenta

No tratamento 0, em todas as camadas classificara-se como rápida. Nos demais tratamentos e profundidade houve uma variação entre moderada rápida, moderada e lenta a moderada, principalmente nos tratamentos 3 e 4, devido a maior intensidade de tráfego de máquinas, ocasionando maior compactação do solo diminuindo a infiltração da água no solo.

A percolação de água está relacionada com densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, as quais influenciam a distribuição dos poros e, por consequência, a permeabilidade dos solos. Como podemos observar na camada 0-10 de todos os tratamentos estudados onde ocorreu tráfego de máquinas a infiltração de água se enquadra na classe muito lenta, isso é devido a primeira camada sofre a maiores alterações das variáveis citadas acima.

De acordo com Cerda (1996), a condutividade hidráulica é um atributo de grande importância para a dinâmica e armazenamento de água no solo, um solo com baixa condutividade hidráulica tender a ser mais vulneráveis a erosão devido a quantidade de água que fica concentrada na superfície do solo, e com isso maior escoamento superficial.

### 6.7 Resistência do solo à penetração

Na tabela 8 está representado o comportamento da resistência do solo à penetração.

**Tabela 8-** Valores médios da resistência do solo à penetração (MPa) do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego de máquina e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Profundidade	Resistência à penetração (Mpa)				
	T0	T1	Tratamentos		
			T2	T3	T4
0-10	0,19 C d	0,75 B c	1,54 A a	1,07 C b	0,74 C c
10-20	0,64 B c	1,60 A b	1,85 A a	1,93 A a	1,96 A a
20-30	0,71 B c	1,58 A b	1,79 A a	2,10 A a	1,90 A a
30-40	0,87 B c	1,46 A b	1,84 A a	2,09 A a	1,91 A a
40-50	1,06 A c	1,58 A b	1,89 A a	1,76 B a	1,72 B a
50-60	1,14 A c	1,59 A b	1,57 A b	1,94 A a	1,83 A a
CV%	21,77	23,23	11,44	27,56	24,59

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%.

CV: coeficiente de variação.

Foi possível observar o aumento da resistência do solo à penetração com o aumento das profundidades, principalmente após o tráfego das máquinas, o mesmo foi ressaltado por Lopes et al., (2015). Resultados semelhantes foram encontrados por Rodrigues (2013), que avaliou a compactação do solo causado por dois sistemas de colheita e em diferentes intensidades de tráfego de máquinas de colheita florestal, onde concluiu que o aumento da intensidade dos modais florestais provocaram incrementos na densidade e resistência a penetração solo.

Nas camadas de 20-30 e 30-40 cm do tratamento com 1 passada do *Harvester* + 6 passadas do *Forwarder* (T3), ocorreu os maiores valores médios de RP 2,10 e 2,09 MPa, respectivamente, já nas condições sem tráfego e nas mesmas profundidades os valores médios

apresentados foram de 0,71 e 0,87 MPa, resultando em um alto incremento de RP em relação as condições sem tráfego.

Em relação à profundidade alcançada pelo tráfego das máquinas, os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os encontrados por Cechin (2007), que ao determinar as alterações a partir da resistência do solo à penetração, verificou que a compactação do solo aconteceu somente no sentido vertical, entre as profundidades de 0 a 43 cm com uma passada da máquina (*Skidder*) e de 8 a 50 cm com três passadas da máquina.

Deste modo, podemos relatar que isso ocorre de acordo com a sobreposição de passadas dos rodados das máquinas, pois ocorre um acúmulo maior de carga sobre o solo. Salire et al., (1994) relata que a compactação do solo pode acontecer tanto nas camadas superficiais, como também nas camadas mais subsuperficial, na compactação superficial ocorre, podemos dizer que acontece pelo efeito da pressão dos pneus, já nas camadas mais profundas a compactação acontece em função da carga total sobre o eixo da máquina devido ao maior peso e intensidade de tráfego das máquinas.

Podemos constatar que o tráfego de máquinas na colheita florestal causa modificações na RP. Este aumento também foi encontrado por Seixa e Oliveira Junior (2001), e Payá (2016), que observaram que a intensidade das máquinas sobre o solo durante a colheita, causaram alterações no solo, resultando em compactação e aumento de RP conforme o aumento da profundidade.

A figura 14 ilustra graficamente a resistência mecânica do solo a penetração de todas as situações estudadas, sendo elas: T0 (Testemunha, sem passagem de máquinas), e os demais tratamentos (T1, T2, T3 e T4) onde ocorreu tráfego das máquinas.

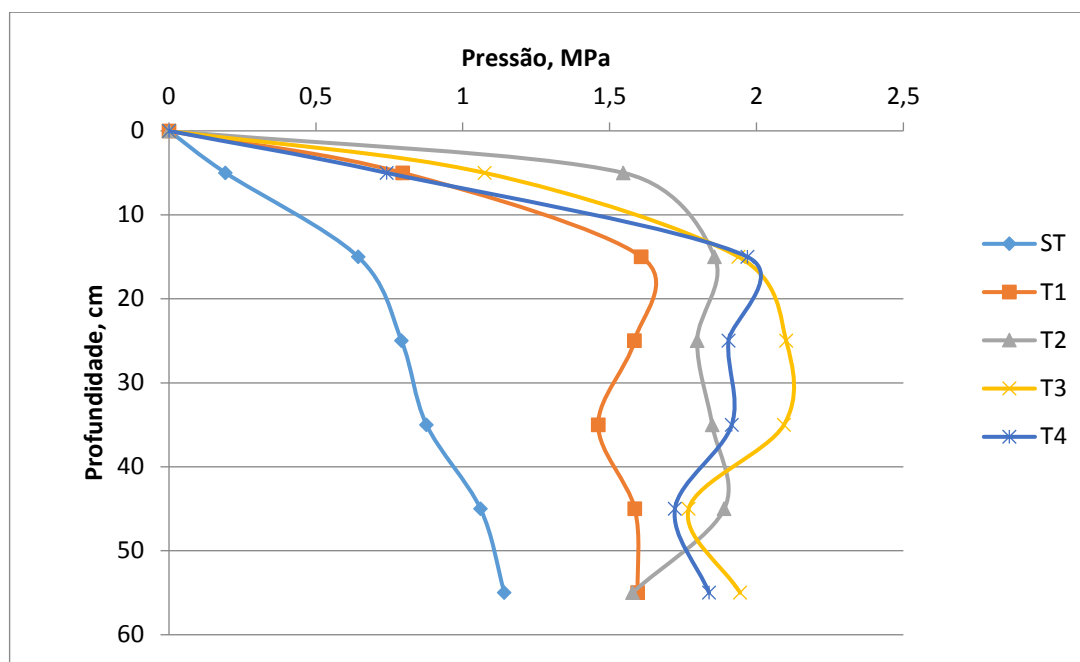


Figura 14 - Resistência mecânica do solo a penetração (Mpa) do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*. Em que: ST – Sem tráfego (Testemunha) T1(1 passada do *Havester* + 1 passada do *Forwarder*), T2(1 passada do *Havester* + 3 passadas do *Forwarder*), T3(1 passada do *Havester* + 6 passadas do *Forwarder*), T4(1 passada do *Havester* + 8 passadas do *Forwarder*).

É possível observar que o tráfego das máquinas, independente da intensidade, causa aumento nos valores de resistência do solo a penetração quando comparado com os valores de resistência obtidos na testemunha, mesmo o aumento sendo significativo, os valores médios permanecem dentro do limite crítico ao desenvolvimento das plantas de 2 MPa recomendado por Lapen et al., (2014).

Taylor et al. (1966) relatam que os níveis críticos de resistência do solo a penetração para um bom desenvolvimento da planta variam de acordo com a espécie cultivada e o tipo de solo. Zou et al. (2000) encontraram em um estudo realizado que o nível limitante para o desenvolvimento das raízes de espécies florestais foi de 3,0 MPa.

Observando o gráfico de resistência a penetração, nota-se que nos tratamentos com 1 passada do *Havester* + 6 passadas do *Forwarder* (T3) e 1 passada do *Havester* + 8 passadas do *Forwarder* (T4) apresentou os maiores valores de resistência a penetração nas camadas de 10-20, 20-30 e 30-40 cm, chegando próximo ou te mesmo passando do limite crítico ao desenvolvimento das plantas de 2 MPa como citou Lapen et al.(2014).

Em relação ao ST houve um aumento considerável a partir da profundidade da camada 10 cm, apresentando um maior crescimento nos valores de RP quando comparado com as diferentes intensidades de tráfego. Payá (2016) relata que isso ocorre devido ao arranjo natural

das partículas do solo, como o aumento do teor de argila e diminuição da matéria orgânica em profundidade, igualdade do solo e o teor de água no momento da leitura a campo.

Segundo Guimarães et al. (2013) os maiores valores de RP na camada podem ser relacionados a menores teores de água no solo, os valores referentes a umidade gravimétrica do solo estão apresentados na tabela 9.

**Tabela 9-** Valores médios de umidade gravimétrica (%), do Latossolo Vermelho estudado, em condições sem tráfego e condições com diferentes intensidades de tráfego de *Harvester* e *Forwarder*.

Umidade do solo gravimétrica (g/g)					
Profundidade	Tratamentos				
	T0	T1	T2	T3	T4
<b>0-10</b>	39,4 A c	37,8 B c	45,2 A b	44,1 A b	61,9 A a
<b>10-20</b>	37,1 B c	48,8 A a	41,7 B b	40,4 A b	43,6 B b
<b>20-30</b>	40,6 A b	41,9 B b	41,0 B b	48,7 A a	46,7 B a
<b>30-40</b>	40,6 A b	35,2 C c	40,1 B b	44,3 A a	45,7 B a
<b>40-50</b>	37,4 B c	40,0 B b	42,1 A b	37,6 B c	45,3B a
<b>Média</b>	39,02	40,7	42,02	43,02	48,6
<b>Cv (%)</b>	4,33	12,64	4,60	9,41	15,41

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; Médias seguidas de letras minúsculas distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Cv: coeficiente de variação.

Estatisticamente apenas a profundidade 0-10 se diferiu das demais no T2, T3 e T4, por essa ser uma camada variável principalmente pela cobertura. Conforme exposto por Reichert et al. (2007), solos com cobertura florestal estão mais propícios a concentrar e manter estável a umidade do solo, devido ao sombreamento e ao acúmulo de matéria orgânica da serrapilheira proveniente das árvores.

Na camada 0-10 cm do tratamento 4, apresentou uma umidade 51,9 g/g, um valor considerável alto comparado com os demais, isso pode justificar a redução da RP quando comparado o tratamento 3 e 4 na camada de 0-10, onde houve uma redução de aproximadamente 33% na RP, visto que o valor da resistência deveria ser próximo ou maior, devido ao tratamento 4 possuir maior intensidade de tráfego. A partir disso podemos relatar que a umidade do solo pode influenciar tanto na leitura como também na compactação do solo. Szymcczak et al. (2014) verificou que a umidade do solo influenciou nas propriedades física do solo, porem quando analisando a diferença durante a presença da chuva e após três e sete dias a chuva não houve influência que venha diferencia a qualidade física do solo.

A umidade é uma variável importante a ser avaliada associada com a resistência a penetração, pois a água atua como lubrificante das partículas do solo, quanto mais seco o solo mais resistência ele vai ter, que pode propiciar falsa ideia de compactação.



## 7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos tratamentos estudados podemos concluir com base nos parâmetros físicos avaliados que:

- A comparação dos parâmetros físicos do solo sobre condições de tráfego e sem tráfego de máquinas confirmou que houve alterações nas propriedades físicas do solo;
- Ocorreu maior incremento na densidade do solo com o aumento do número de passadas de Forwarder;
- Todas as situações de tráfego das máquinas estudadas causaram aumento na resistência mecânica do solo à penetração na camada superficial do solo. Porém os maiores valores de resistência do solo à penetração ocorreram no tratamento 3, apresentando valores acima do RP crítica em algumas profundidades;
- A condutividade hidráulica saturada foi sensível em responder os efeitos da compactação com os maiores valores de percolação de água no Tratamento sem tráfego de máquinas e ocorrendo menor infiltração na camada superficial de 0-10cm;
- Os resultados obtidos neste trabalho confirmaram as informações vistas em literatura em que a maior parte da compactação do solo ocorre durante as primeiras passadas.

## 8 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se à empresa:

- Planejar as operações de colheita da madeira, estabelecendo restrições ao tráfego com elevados teores de água, evitando a compactação;
- Estabelecer trilhas específicas de tráfego, com finalidade de concentrar os danos causados ao solo em uma área de mínima;
- A realização dos estudos de compactação do solo, de modo a gerar mapas de sensibilidade para os diferentes tipos de solo da empresa, possibilitando identificar as áreas mais sensíveis à compactação;
- Controle da biomassa residual oriunda da colheita florestal sobre a linha de tráfego das máquinas, a fim de diminuir a compactação;
- Subsolagem em linha de tráfego, se possível em maior profundidade nos níveis mais críticos;

## REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília: 2012. 150 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12>>
- ABRAF; **Anuário Estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**, Brasília-ABRAF, 2013,150p.
- AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Estudo do solo para fins ambientais**. Santa Maria: Editora Palotti, 2003. 43p.
- BELTRAME, L.F.S. & TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. Lav. Arrozreira, 32:59-62, 1980a. CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vicosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.
- BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 206 f. Tese- (Doutorado em Ciência do solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria Orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa v. VII, p. 221-278, 2011.
- BROWN, R. O.; DINIZ, C. C. C. **Colheita florestal e manutenção de equipamentos móveis**. 2017.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba - SP, Degaspari, p. 132, 1997.
- CAMARGO, O.A. Efeitos da compactação em características do solo. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.
- CERDÀ, A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v.69, n.2, p.217-232, 1996.
- DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.
- DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1194. 114 f. Tese (Doutorado)- Michigan State University, Michigan 1994.
- DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p.175-182, 1996.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 4.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro, EMBRAPA Solos, 2006. 306p.

FERNANDES, H. C.; ORLANDO, R. C.; LANÇAS, K. P. Compactação do solo em relação a exploração florestal: influência do *Foewarder* e do *Harvester*. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v.5, n4, p-276-280, 1997.

FIGUEIREDO, E. O. Reflorestamento com teca (*Tectona grandis* LF) no estado do Acre. **Embrapa Acre-Documentos (INFOTECA-E)**, 2001.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. de 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, n. 3, 2000.

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 American Journal* , v.53, p.946-50, 1989.

GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. de. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, v. 25, n. 2, p. 421-431, 1966.

GUIMARÃES, R. M. L., BALL, B. C., TORMENA, C. A., GIAROLA, N. F. B., SILVA, Á. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 92-99, 2013.

HILLEL, D. **Solo e água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2009. 49p

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Quedas do Iguaçu-PR**. Disponível em: < <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=410720> >. Acesso em: 01 de abr. 2018, 13:20:26.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. Piracicaba – SP, Editora Agronômica Ceres, p.262, 1979.

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

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. M. P. da; IMHODD, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n 6, p.945-951, nov./dez., 2004.

LOPES, E. da 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. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 223-230, 2015.

LOPES, S. E. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal**. 2007. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.

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

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. Evolução dos sistemas de colheita de Pinus na Região Sul do Brasil. **Curitiba: FUPEF**, 1998.

Millar, A.A. Drenagem de terras agrícolas: Bases agronômicas. São Paulo: Editora, 1988. 306p.

MOLINA JUNIOR, W. F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. 1. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2017. v. 1. 223p .

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

OLIVEIRA, D. de ; LOPES, E. S. da. Determinação da compactação do solo causada pela colheita de madeira com harvester e forwarder. **Anais...** In: XIX Encontro Anual de Iniciação Científica 2010, Guarapuava.

PAYÀ, T. I. de A. **Impacto do tráfego de máquinas de colheita da madeira na qualidade física de um nitossolo bruno**. 84 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati, 2016.

PEREIRA ,M. M.; SILVA,N. D.; OLIVEIRA F. E. R.; VIANA,P. C.; LIMA,R. N.; LIMA,J. G. A. Determinação da condutividade hidráulica saturada em um permeâmetro de carga constante. **Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, XXV CONIRD**, UFS - São Cristóvão/SE,2013.

POLTORAK, B. J.; LABELLE, E. R.; JAEGER, D. Soil Displacement during Ground-Based Mechanized Forest Operations Using Mixed-Wood Brush Mats. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p.96-104, jun. 2018.

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

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

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.

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

RODRIGUES, C. K. **Compactação do solo causada por dois sistemas de colheita de madeira em florestas de *Eucalyptus grandis***. 96 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati, 2013.

SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.31, p.235-248, 1994.

SCHIMIZU, J. Y., **Pinus na Silvicultura Brasileira**, Embrapa Florestas. Disponível em: [http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/artigos/pinus\\_na\\_silvicultura\\_brasileira.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/artigos/pinus_na_silvicultura_brasileira.html). Acesso em 25 de abril de 2017.

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.; SOUZA, C. R. de. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, 2007.

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.

SILVA R. S.; FENNER P. T.; CATANEO A.; EQUIPE TÉCNICA DA DURATEX. Desempenho de máquinas florestais de colheita: derrubador-processador slingshot sobre as esteiras. **Anais...** In: 6º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL 2003, Belo Horizonte: UFV/SIF, 2003. p.267-179.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F. de; COSTA, L; M. da; MENDONÇA, E. de S.; LEITE, R. P. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um “forwarder” nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 371-377, 2007.

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

SOLOS, Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Rio de Janeiro, 2013.

SNIF - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. Produção florestal. Serviço Florestal Brasileiro, 2016. Disponível em [https://http://www.florestal.gov.br/snif/images/stories/ProducaoFlorestal/boletim\\_snif\\_producao%20florestal\\_dez\\_2016\\_final.pdf](https://http://www.florestal.gov.br/snif/images/stories/ProducaoFlorestal/boletim_snif_producao%20florestal_dez_2016_final.pdf)

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.

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 região Sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38, p. 641-648, 2014.

SZYMCZAK, D. A. **Compactação do solo causada pelos tratores florestais *Harvester e Forwarder* na colheita de *pinus taeda L.*** 83 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

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.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência a penetração de um solo sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

WOLFF II, N. I. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda L.*** 2012. Dissertação (Mestrado). Departamento Ciências Florestais. Universidade Estadual Do Centro-Oeste, Irati, 62f. 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.