

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

Francieli de Vargas

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DESBASTE MECANIZADO  
DE *Eucalyptus saligna***

Santa Maria, RS  
2019

Francieli de Vargas

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DESBASTE MECANIZADO DE  
*Eucalyptus saligna*

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Catize Brandelero

Santa Maria, RS  
2019

de Vargas, Francieli  
QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DESBASTE MECANIZADO DE  
Eucalyptus saligna / Francieli de Vargas.- 2019.  
63 p.; 30 cm

Orientadora: Catize Brandelero  
Coorientador: Lúcio de Paula Amaral  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. Tráfego de máquinas 2. Atributos físicos 3.  
Compactação do solo I. Brandelero, Catize II. de Paula  
Amaral, Lúcio III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Revisão: Elivélton Krummel – Marca texto Assessoria

Copyright © 2019

Todos os direitos autorais reservados a Francieli de Vargas. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: devargasfrancieli@gmail.com

Francieli de Vargas

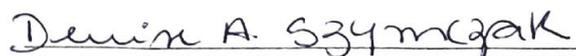
**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DESBASTE MECANIZADO DE *Eucalyptus saligna***

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

**Aprovado em 22 de fevereiro de 2019:**

  
\_\_\_\_\_  
Catize Brandelero, Dra. (UFSM)  
(Presidente/Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Lúcio de Paula Amaral, Dr. (UFSM)

  
\_\_\_\_\_  
Denise Andréia Szymczak, Dra. (UTFPR)

Santa Maria, RS  
2019

À minha querida e incentivadora mãe,  
Jane, pelo apoio diário.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela possibilidade de vida e por abençoar o meu caminho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES –, pelo auxílio concedido.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, fundamentais para que fosse possível a projeção e desenvolvimento deste trabalho.

À Agropecuária Condor, pelo grande apoio, interesse, logística e colaboração nas atividades, bem como pela concessão de áreas da empresa, de forma que este trabalho pudesse ser, efetivamente, realizado. Especialmente, ao Engenheiro Agrônomo Ricardo Trois, ao Mathias Kisslinger Rodrigues e aos seus funcionários, pela ajuda prestada durante as atividades de campo. Ao Nestor Gracioli e à equipe de campo, assim como os operadores das máquinas.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Catize Brandelero, pela valiosa orientação, ensinamentos e compreensão durante a realização deste trabalho. Aos professores, Denise Andréia Szymczak, Lúcio de Paula Amaral e Valmir Werner, pelas contribuições e pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

Aos professores que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho: Fernando Schlosser, Alessandro Miola, Paulo Gubiani, pelo empréstimo de materiais de coleta e a disponibilidade de realizar o processamento das amostras de solo no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria; à professora Mirta Teresinha Petry, pelos ensinamentos prestados e aos bolsistas do IRRIGA e pela contribuição nas análises de solo; aos professores Alessandro Dal Col Lúcio e Sidnei Lopes, no desenvolvimento das análises estatísticas.

À equipe MECANIZA, especialmente aos colegas Juliano, Guilherme O., Guilherme M., Matheus, Wilson, nas atividades de campo.

À minha família, principalmente à minha mãe, Jane Paula Pacholski, que nunca mediu esforços para possibilitar a concretização de minha formação.

Aos meus amigos, Angélica Streit, Geovane Theisen, Bárbara Nunes, pelo incentivo e apoio diante das dificuldades, bem como às colegas de PPGEA, Sabrina Bellochio e Marília Boff. A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

### QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DESBASTE MECANIZADO DE *Eucalyptus saligna*

AUTORA: Francieli de Vargas  
ORIENTADORA: Catize Brandelero

O tráfego de máquinas é a principal causa de compactação dos solos florestais, devido ao fato de que ocorrem deformações no solo, ocasionadas pela pressão da massa das máquinas, seja no momento em que há o corte ou mesmo o baldeio da madeira. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo avaliar a compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas, na operação de desbaste mecanizado em povoamento de *Eucalyptus saligna* Smith. O estudo foi realizado em povoamento florestal, no município de Butiá, Rio Grande do Sul. Foram avaliadas as alterações nas propriedades físicas do solo em três tratamentos: sem tráfego, após o corte e após o baldeio da madeira com carga completa. Houve a demarcação de dois locais de estudo, nos quais foi efetuado o inventário florestal, o levantamento de biomassa e as coletas de anéis volumétricos no solo, para determinar a microporosidade, macroporosidade e densidade. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), de arranjo bifatorial, com parcelas subdivididas. Para a comparação dos atributos físicos, foi utilizado o teste de Tukey a 0,05 de significância. Os resultados evidenciaram que a operação de desbaste mecanizado ocasionou a compactação do solo. Ocorreu um acréscimo nos valores de densidade do solo, principalmente na condição após o baldeio, o que resultou em valores médios de 1,638 Mg.m<sup>-3</sup>, 1,674 Mg.m<sup>-3</sup>, 1,617 Mg.m<sup>-3</sup>, para as camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm, respectivamente. Esses valores ultrapassaram a densidade considerada crítica para solos argilosos, que varia de 1,40 a 1,60 Mg.m<sup>-3</sup>. Também houve diminuição dos macroporos, com valores próximos e abaixo do limite considerável como prejudicial ao desenvolvimento das plantas (0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). O conhecimento das deformações do solo ocasionada pelas operações florestais contribui para a melhoria dos processos futuros, com o intuito de balizar a qualidade física do solo, a fim de oferecer condições benéficas ao crescimento das plantas.

**Palavras-chave:** Tráfego de máquinas; Atributos físicos; Compactação do solo.

## ABSTRACT

### EVALUATION OF THE PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL IN MACHINING SHEEP OF *Eucalyptus saligna*

AUTHOR: Francieli de Vargas

ADVISOR: Catize Brandelero

Machine traffic is the main cause of compaction of forest soils, due to the fact that deformations occur in the soil, caused by the pressure of the mass of the machines, either at the time of the cutting or even the wood bucket. In this sense, this work had the objective of evaluating the soil compaction caused by the traffic of machines in the mechanized thinning operation in *Eucalyptus saligna* Smith. The study was carried out in a forest, in the city of Butiá, Rio Grande do Sul. Changes in soil physical properties were evaluated in three treatments: no traffic, after cutting and after full wood loading. Two study sites were demarcated, in which the forest inventory, the biomass survey and the volumetric ring collections were determined in the soil to determine microporosity, macroporosity and density. The experimental design was the fully randomized (DIC), of two - factorial arrangement, with subdivided plots. For the comparison of the physical attributes, the Tukey test at 0.05 of significance was used. The results evidenced that the mechanized thinning operation caused soil compaction. There was an increase in the values of soil density, mainly in the condition after the bucket, which resulted in average values of 1,638 Mg.m<sup>-3</sup>, 1,674 Mg.m<sup>-3</sup>, 1,617 Mg.m<sup>-3</sup>, for the layers of 0 to 5 cm, 5 to 10 cm and 10 to 20 cm, respectively. These values exceeded the density considered critical for clayey soils, ranging from 1.40 to 1.60 Mg.m<sup>3</sup>. There was also a decrease of macropores, with values close to and below the considerable limit as detrimental to the development of plants (0.10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). The knowledge of soil deformations caused by forest operations contributes to the improvement of future processes, with the aim of assessing the physical quality of the soil, in order to offer beneficial conditions to the growth of the plants.

**Keywords:** Traffic of machines; Physical attributes; Soil compaction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas de desbaste: (a) seletivo por baixo; (b) seletivo pelo alto .....	16
Figura 2 – Evolução da área plantada com eucalipto de 2006 a 2016 no Brasil .....	17
Figura 3 – Distribuição do número de pesquisas sobre compactação de solos, a partir de colheita florestal mecanizada, nos estados brasileiros.....	22
Figura 4 – Triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo para classificação das classes texturais do solo .....	23
Figura 5 – Representação dos microporos e macroporos.....	25
Figura 6 – Localização da área de estudo .....	26
Figura 7 – Ilustração do povoamento florestal e demarcação da área de estudo .....	27
Figura 8 – Localização das áreas de estudo no talhão .....	28
Figura 9 – Esquema da operação de desbaste utilizado.....	29
Figura 10 – Fluxograma das operações do talhão em estudo, englobando o período de implantação (2008) até o segundo desbaste (2018) .....	30
Figura 11 – Demarcação das árvores que foram cortadas pelo: (a) desbaste seletivo; (b) sistemático .....	31
Figura 12 – Discos para determinação da densidade da madeira .....	32
Figura 13 – Procedimentos: (a) pesagem da biomassa úmida; (b) sacos de papel com a biomassa para pesagem .....	32
Figura 14 – Máquina utilizada no corte e processamento .....	33
Figura 15 – Trator Valtra utilizado no baldeio da madeira .....	34
Figura 16 – Reboque com grua da fabricante Penzsaur .....	35
Figura 17 – Representação do baldeio com carga completa .....	36
Figura 18 – Profundidades de avaliação do solo em camadas: (a) 0 a 5 cm; (b) 5 a 10 cm; (c) 10 a 20 cm; (d) 20 a 30 cm.....	37
Figura 19 – Representação dos valores médios de densidade do solo ( $Mg.m^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> .....	42
Figura 20 – Representação ilustrativa do solo na trilha de tráfego: (a) após a passagem do harvester; (b) após a passagem do baldeio.....	44
Figura 21 – Representação dos valores médios de macroporosidade do solo ( $m^3.m^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> .....	47
Figura 22 – Representação dos valores médios de microporosidade do solo ( $m^3.m^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do povoamento em estudo, localizado em Butiá, RS.....	27
Tabela 2 – Granulometria do solo em cada camada avaliada para os dois locais no povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> .....	38
Tabela 3 – Valores médios da densidade do solo (Mg.m <sup>3</sup> ) em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> com 10 anos de Idade.....	41
Tabela 4 – Valores médios da macroporosidade do solo (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ) em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> com 10 anos de idade.....	46
Tabela 5 – Valores médios da microporosidade do solo (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ) em povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> com 10 anos de idade.....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	HIPÓTESES .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	14
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1	DESBASTE MECANIZADO .....	15
2.2	ASPECTOS DA COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA.....	17
2.3	COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	19
2.4	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .....	20
2.4.1.1	<i>Textura do solo.....</i>	23
2.4.1.2	<i>Densidade do solo.....</i>	24
2.4.1.3	<i>Porosidade do solo.....</i>	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO .....	26
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
<b>3.2.1</b>	<b>Descrição dos locais de estudo .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Sistema de desbaste .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Inventário florestal.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Densidade da madeira.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Biomassa florestal residual.....</b>	<b>32</b>
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MÁQUINAS UTILIZADAS NO ESTUDO .....	33
<b>3.3.1</b>	<b>Corte e processamento.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Baldeio.....</b>	<b>34</b>
3.4	OS TRATAMENTOS.....	35
3.5	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .....	37
<b>3.5.1</b>	<b>Granulometria do solo .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Densidade e porosidade do solo.....</b>	<b>39</b>
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .....	40
<b>4.1.1</b>	<b>Densidade do solo.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Macroporosidade do solo .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Microporosidade do solo .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE A – ESQUEMA DOS TRATAMENTOS NO LOCAL A E AS COLETAS DE SOLO EM RELAÇÃO AO RODADO DA MÁQUINA.....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE B – PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DOA ANÉIS VOLUMÉTRICOS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro segue em desenvolvimento. No ano de 2016, o país liderou o *ranking* global de produtividade florestal, com a média de 35,7 m<sup>3</sup>/ha para plantios de *Eucalyptus* sp. Além disso, a área total em hectares teve um acréscimo de 0,5% em relação ao ano de 2015 (IBÁ, 2017). Ainda que os números demonstrem o potencial que o país possui no segmento florestal, é necessário o uso racional dos recursos naturais e, para tanto, é imprescindível o manejo florestal, bem como o planejamento das operações, a fim de que seja mais sustentável a produção florestal.

Dentre os recursos naturais, o solo é um dos mais afetados no setor florestal, em virtude do uso desordenado da mecanização. Isso, por sua vez, causa efeitos adversos, tais como: redução de área produtiva (RICHART et al., 2005), degradação do solo (DIAS JUNIOR et al., 2005), aumento da suscetibilidade de erosão (SEIXAS e OLIVEIRA JÚNIOR, 2001), perda na qualidade biológica (ALLMAN et al., 2015), aumento da demanda de potência motora para o preparo do solo (REINERT e REICHERT, 2006), o que eleva os custos das operações subsequentes (MACHADO, 2014).

Em determinadas situações, sobretudo de demanda por matéria-prima, a exemplo do setor florestal, o solo é utilizado de maneira desordenada, de forma que, nos últimos anos, há uma intensificação nas operações florestais. Em função disso, Richart et al. (2005) destacam que o tráfego de máquinas é a principal causa de incremento na densidade do solo, o que caracteriza a sua compactação. Por isso, Dias Junior et al. (2005) advertem que uma das limitações para alcançar o desenvolvimento florestal sustentável está relacionada ao tráfego de máquinas durante as operações de colheita e transporte de madeira, justamente por causar a compactação do solo.

Como consequência da compactação do solo, podem ser mencionadas a dificuldade de crescimento e a distribuição das raízes (SPERANDIO e CECÍLIO, 2017), a redução da condutividade hidráulica (SZYMCZAK, 2013) e da capacidade de armazenamento de água (ROSA et al., 2018), a limitação da adsorção e absorção de nutrientes pelas plantas (RICHART et al., 2005), e a alteração da porosidade, visto que ocasionam na diminuição do tamanho dos poros (SAMPIETRO, 2013) e no aumento dos valores de resistência do solo à penetração (LIMA et al., 2008).

Assim, é necessário conhecer os níveis de compactação do solo e a sua relação com o sistema de colheita florestal, o que possibilita a realização e/ou planejamento das operações mecanizadas de maneira mais adequada e permanentemente, para almejar o alcance das diretrizes pré-estabelecidas. Quando consideradas as operações de silvicultura, é necessário conhecer os pontos com maior grau de compactação do solo, com o intuito de assumir decisões adequadas para minimizar os impactos sobre o ambiente e preservar esse recurso natural.

Ainda que nesse tema haja estudos que avaliem a relações dos sistemas de colheita mecanizada na compactação de solos florestais. Salienta-se que estudos considerando as interações das operações de desbaste mecanizado e os solos, ainda são pouco expressivos no Brasil. Além disso, a operação de desbaste é fundamental para o sucesso das florestas ao fim da rotação, para a venda das toras.

Neste segmento, as empresas de construção civil, moveleiras e painéis são as que demandam dessa madeira. Estas empresas contribuem para economia e desenvolvimento da região, assim como, buscam alternativas para minimizar os impactos ocasionados pela operação mecanizada. Desse modo, o estudo, que é o primeiro realizado nesse sistema, no Rio Grande do Sul, teve como intuito analisar os efeitos do desbaste mecanizado no solo.

## 1.1 HIPÓTESES

A operação de desbaste mecanizado em povoamento de *Eucalyptus saligna* altera as propriedades físicas do solo, na linha de tráfego das máquinas, ocasionando a sua compactação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas, na operação de desbaste mecanizado em povoamento de *Eucalyptus saligna*.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Verificar as alterações nas propriedades físicas do solo, em três condições: sem tráfego, após o corte e após o baldeio da madeira.
- b) Analisar, nos dois locais, as três condições de tráfego por meio dos atributos físicos de densidade, macroporosidade e microporosidade do solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste item são abordados tópicos, tais como: o desbaste mecanizado, os aspectos da colheita florestal mecanizada, a compactação do solo e os atributos físicos do solo.

### 2.1 DESBASTE MECANIZADO

As ações previstas no manejo florestal, quando executadas, contribuem na qualidade e produtividade dos povoamentos florestais. Para Higman et al. (2015), o manejo florestal é definido como desenvolvimento sustentável, economicamente viável, ambientalmente adequado e socialmente benéfico, relacionando-se com as exigências do presente e das futuras gerações. Segundo Trevisan et al. (2009), dentre as ações previstas no manejo, pode ser destacado o desbaste como sendo um dos mais importantes tratamentos silviculturais. Burgin (2016) salienta que essa ação tem como objetivo o aumento do crescimento individual das árvores remanescentes do povoamento e, para isso, ocorre a retirada planejada de parte das árvores do povoamento. Schneider (2002) salienta que o desbaste determina o padrão de qualidade para o povoamento e propicia o alcance do potencial produtivo do sítio.

A partir do plano de manejo é estabelecido quando serão realizados os desbastes. De acordo com Higman et al. (2015), o plano de manejo é elaborado para uma determinada unidade de manejo florestal, sendo dividido em: plano estratégico (que descreve o conjunto de operações florestais para a rotação completa, em torno de 25 anos); plano tático (detalha as atividades para um período de cinco anos); e plano operacional (compreende o planejamento das atividades mês a mês, pelo período de um ano).

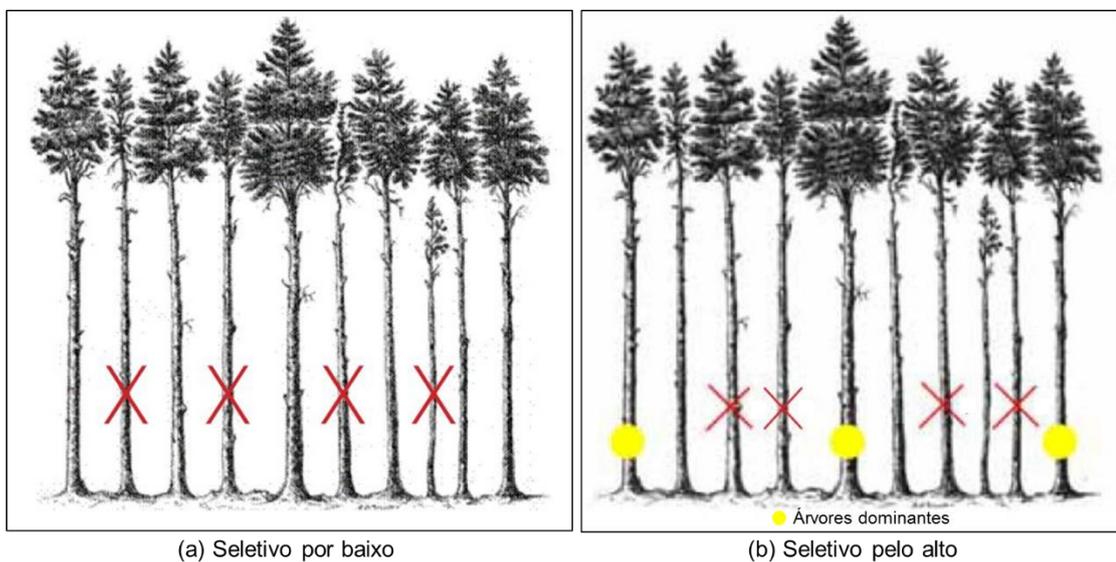
O desbaste é uma intervenção que deve ser planejada em função da finalidade do povoamento e das necessidades do sítio, o que possui relação direta ao crescimento em diâmetro do povoamento (DAVID et al., 2017). A retirada de indivíduos beneficia o crescimento radial das árvores remanescentes, favorece a produção de toras de maior diâmetro ao fim da rotação, além de antecipar a renda proveniente da venda dos indivíduos do desbaste (DAVID et al., 2014).

Para Schneider e Schneider (2008), o desbaste é um método combinado, que se constitui de forma sistemática e seletiva. O desbaste sistemático compreende a

retirada das quintas linhas de árvores, com a finalidade de obter as trilhas de acesso para a máquina que, com o auxílio da grua, realiza o corte em ambos os lados da trilha de árvores do desbaste seletivo.

Sobre o desbaste seletivo, a retirada de árvores segue restrições pré-estabelecidas, que variam de acordo com o propósito a que se destinará a madeira. Normalmente, é utilizado o sistema seletivo por baixo, que consiste na remoção das árvores inferiores (baixa altura, defeituosas e tortuosas – Figura 1<sup>a</sup>) e, portanto, são selecionados os indivíduos previamente a campo, a fim de optar pela permanência das árvores de maiores diâmetros (SIXE, 2015). De outro modo, o desbaste seletivo pelo alto compreende a remoção, no povoamento, de árvores do estrato médio ao superior, de forma que sejam selecionadas as árvores concorrentes das dominantes. Ademais, esse método tem a finalidade de propor ao estrato inferior o potencial para as árvores, possibilitando o alcance de valor comercial (RIBEIRO et al., 2002). A Figura 1b demonstra as três árvores consideradas dominantes e as árvores selecionadas com “x” podem ser retiradas, segundo a sua ordem de concorrência.

Figura 1 – Sistemas de desbaste: (a) seletivo por baixo; (b) seletivo pelo alto

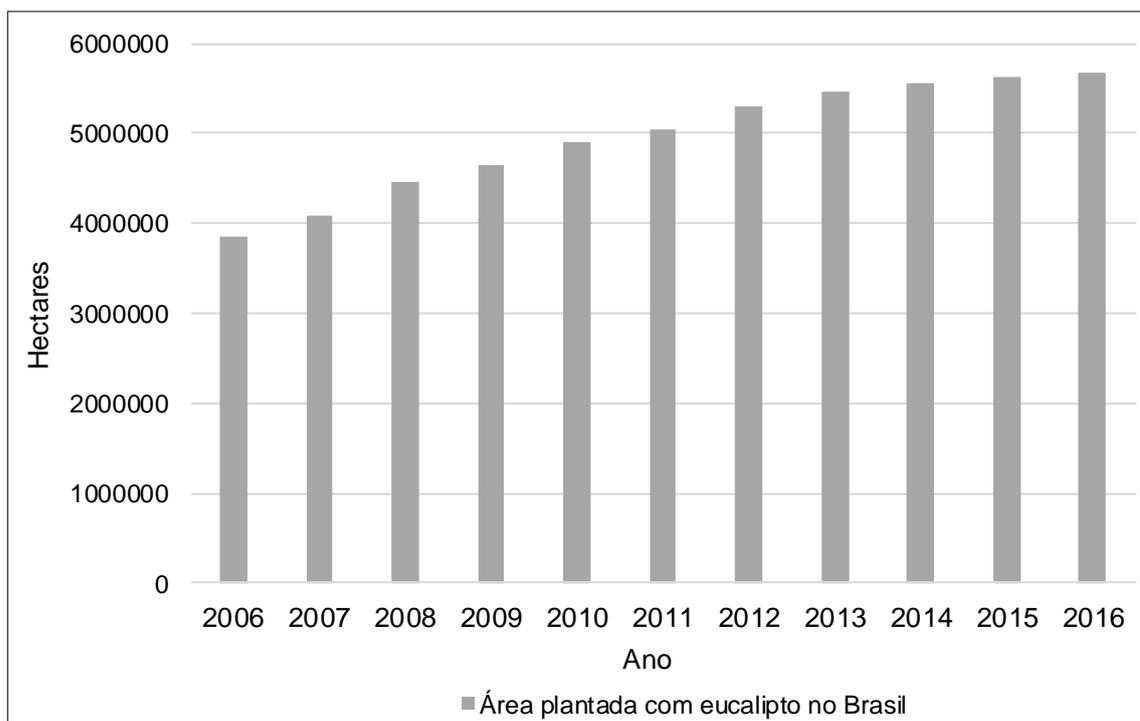


Fonte: Adaptação de Dobner Jr e Huss (2015).

## 2.2 ASPECTOS DA COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA

No ano de 2016, a extensão territorial de florestas plantadas foi de 7,84 milhões de hectares. Destes, 72% são ocupados por plantios de *Eucalyptus* sp., representando 5,7 milhões de hectares (IBÁ, 2017). A partir da compilação de dados de área plantada com a espécie *Eucalyptus* sp. pelo IBÁ, foi elaborada a Figura 2, na qual é possível observar a evolução da área plantada de eucalipto no Brasil, entre os anos de 2006 a 2016. Em função desse crescimento, houve a necessidade de mudanças significativas para atender a demanda. Nesse aspecto, pode ser destacado o aumento da mecanização nas atividades operacionais.

Figura 2 – Evolução da área plantada com eucalipto de 2006 a 2016 no Brasil



Fonte: Adaptação de IBÁ (2017).

De acordo com Lopes et al. (2006), há uma intensificação dos problemas de ordem ambiental, relacionada aos recursos hídricos e edáficos, em consequência do aumento significativo do uso de máquinas na produção agrícola e florestal. A partir da década de 90, são intensificadas as operações mecanizadas na colheita florestal (SEIXAS; OLIVEIRA JÚNIOR; SOUZA, 1998) e, desde então, isso é acompanhado

do processo acelerado de degradação do solo, que é ocasionado por esse sistema, sobretudo, devido ao aumento do tráfego de máquinas. Isso pode afetar, progressivamente, o seu potencial produtivo, por causa do desequilíbrio das características físicas, químicas e biológicas do solo.

A escolha adequada das máquinas e equipamentos a serem utilizados, a realização de estudos prévios nas áreas (clima, topografia, características do povoamento) e, principalmente a análise do solo, são fatores indispensáveis para avaliar a compactação em solos florestais. Nos trabalhos de pesquisa relatados, são previamente descritas as máquinas, a espécie e as condições do solo, em decorrência de sua compactação.

Sampietro (2013) avaliou o tráfego em cinco tipos de solos, após a colheita de madeira de *Eucalyptus* sp., a fim de avaliar os indicadores de qualidade física e de trafegabilidade e constatou que os resultados dos parâmetros físicos estão relacionados com os atributos texturais de cada solo e são influenciados pelo seu estado de compactação.

Cambi et al. (2015) ressaltam que o uso de máquinas nas operações florestais aumentou exponencialmente os efeitos diretos e indiretos do tráfego, os quais dependem de vários fatores, dentre eles; a textura do solo, a umidade, a inclinação do terreno, o peso das máquinas, o tipo de rodados, além do número de passadas no mesmo ponto. Rodrigues (2013) resalta que o aumento da densidade do solo ocorre durante as primeiras passadas da máquina e, portanto, realizar as operações em trilhas predeterminadas implica na porcentagem menor de área afetada pela compactação, assim como no monitoramento das atividades previstas no microplanejamento (SEIXAS e SOUZA, 2007).

O microplanejamento é o responsável pelo detalhamento das operações, pela identificação de cada ponto de adversidade, assim como pela adaptação do planejamento, visando possíveis soluções (VARGAS et al., 2018). Além disso, Rodrigues e Lopes (2018) ressaltam que para o planejamento é necessário considerar a viabilidade no ponto de vista técnico, econômico e ambiental, pois os efeitos das máquinas poderão afetar o ecossistema de forma aleatória ou sistemática, não só *in situ*, mas no entorno também. Em razão disso, cabe a intensificação de estudos que visem identificar a compactação nos solos de áreas florestais, após as operações mecanizadas.

### 2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O uso intensivo de máquinas acarreta em danos ao solo, principalmente em termos de compactação (FERNANDES e SOUZA, 2003; LOPES et al., 2006; LOPES et al., 2015). A compactação é definida como o incremento na densidade do solo, ou seja, reduz seu volume através da aplicação de uma carga dinâmica ou pressão, o que causa um decréscimo na porcentagem de poros do solo, devido à alteração dos agregados (SEIXAS, 1997; SZYMCZAK, 2013; FENNER, 2014), além de modificar o processo de infiltração, o movimento interno de água no solo e o aumento da resistência mecânica do mesmo ao crescimento das raízes (SAMPIETR; LOPES; REICHERT, 2015). O nível de compactação do solo é influenciado por diversos fatores, sobre os quais podem ser destacados: o tipo de máquinas e rodados; o tamanho, a forma e a pressão dos pneus; a presença de resíduos florestais sobre o solo; o teor de umidade e o número de passadas da máquina (DIAS JUNIOR et al., 2005; LOPES et al., 2011; PINCELLI et al., 2014; CAMBI et al., 2017).

A compactação do solo é um problema antigo que foi intensificado com o aumento da potência dos equipamentos utilizados na agricultura, visto que para atingir a força requerida para realizar as operações, tiveram seu tamanho e massa aumentados proporcionalmente (REICHERT et al., 2007). Os efeitos negativos, relacionados ao tráfego dessas máquinas, podem ocasionar danos a curto e a longo prazo. Isso reflete na redução de área produtiva, na degradação do solo, no aumento nas taxas de erosão, na dificuldade de crescimento das raízes, na qualidade e quantidade de brotação, na perda na qualidade biológica, além de ocasionar o aumento nos custos de preparo de solo (MACHADO, 2014).

Allman et al. (2015) avaliaram a compactação de solo em oito povoamentos florestais, localizados na Eslováquia e na República Checa e destacaram que as máquinas causaram compactação no solo, independentemente das características de massa e do tipo de máquina (*harvester*, *forwarder* ou *skidder*). Em estudo, Sampietro (2010) observou que o tráfego das máquinas, em condições úmidas, causou o maior grau de compactação.

Em pesquisa sobre a compactação do solo em áreas de Argissolo Vermelho-Amarelo, em três condições, com o plantio de *Eucalyptus* sp. de 1,4 anos de idade; área recém colhida (com *Feller Buncher* e *Skidder*); e com *Eucalyptus* sp. de 6 anos de idade, Pincelli et al. (2014) observaram que para as três condições, os valores de

densidade do solo não diferiram significativamente entre si, evidenciando que o tráfego das máquinas não influenciou com o passar dos anos. A partir de sua pesquisa, Dedecek e Gava (2005) evidenciaram a influência da compactação do solo após sete anos, em uma área de rebrota de *Eucalyptus* sp., com perdas de até dois terços na produtividade, nas linhas de tráfego intenso das máquinas, o que demonstra que a compactação do solo persiste até a próxima operação de colheita.

Mendes e Seixas (2018) avaliaram os efeitos da colheita de *Eucalyptus saligna*, em um povoamento com pousio, por cerca de 40 anos. Foram aplicados três tratamentos: CCV - colheita convencional com extração mecanizada; CIR1 - colheita de impacto reduzido com extração mecanizada; e CIR2 - colheita de impacto reduzido com extração animal para lenha e mecanizada para tora. Como resultado, os dois tratamentos com extração mecanizada de madeira apresentaram o aumento na densidade aparente de solo e percentagem de área afetada. Além disso, o estudo desenvolvido por Sperandio e Cecílio (2017), em povoamento de *Eucalyptus* sp. de 6 anos, em Latossolo Vermelho Amarelo, com declividade média de 25%, no estado do Espírito Santo, aponta que os atributos físicos do solo não apresentaram diferença significativa antes e após a colheita semimecanizada.

## 2.4 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

O sistema de manejo empregado no solo e a intensidade do tráfego de máquinas alteram as características físicas do solo. Para a qualidade física do solo, são utilizados os atributos físicos como indicadores. Conforme Stefanoski et al. (2013), as propriedades físicas do solo são interdependentes, ou seja, a modificação de uma consequentemente altera as demais. Dessa forma, a densidade do solo, a resistência à penetração, a permeabilidade, a aeração, a agregação, a porosidade e a umidade do solo são alteradas pelo tipo de manejo realizado (DORAN e PARKIN, 1994).

Considerando os estudos relacionados com a compactação do solo em áreas florestais e seus respectivos atributos analisados, foi estruturado o Quadro 1, que compreende o período de 2001 a 2018. Para a sua composição, foram destacadas as seguintes variáveis: local de realização do estudo, tipo de solo, máquinas que atuaram nas operações florestais e quais os atributos físicos do solo (densidade do solo, resistência à penetração do solo, porosidade total, umidade gravimétrica).

Quadro 1 – Relação de estudos com atributos físicos utilizados para verificar a compactação do solo em áreas florestais no Brasil

Autor (es)	Local	Solo	Máquina (s)	Atributos físicos do solo			
				Ds	RP	Pt	Ug
Rodrigues et al. (2018)	Telêmaco Borba/PR	Latossolo	<i>feller-buncher e skidder</i>	X	X	X	X
Rodrigues e Lopes (2018)	Região dos Campos Gerais/PR	Latossolo Vermelho franco-argilo-arenoso	<i>feller-buncher e skidder</i>		X		
Sperandio e Cecílio (2017)	Santa Teresa/ES	Latossolo Vermelho Amarelo	colheita semimecanizada	X		X	
Sampietro e Lopes (2016)	Santa Catarina	Cambissolo Húmico Aluminíco típico	<i>feller-buncher e skidder</i>		X		
Lopes et al. (2015)	Campo do Tenente/PR	Cambissolo Háplico	<i>harvester e forwarder</i>	X	X	X	X
Rodrigues et al. (2015)	Telêmaco Borba/PR	Latossolo Vermelho Distrófico típico	<i>harvester e forwarder</i>		X		X
Szymczak (2015)	Quedas do Iguaçú/PR	Latossolo Vermelho Distrófico	<i>harvester e forwarder</i>	X	X	X	X
Pincelli et al. (2014)	Mogi Guaçu/SP	Argissolo Vermelho- Amarelo	<i>feller-buncher e skidder</i>	X	X		
Szymczak et al. (2014)	Sudoeste do Paraná	Latossolo Vermelho Distrófico típico	<i>harvester e forwarder</i>	X	X	X	X
Sampietro (2013)	Dom Feliciano/RS	Cambissolo Háplico Tb Distrófico	<i>harvester e forwarder</i>	X	X	X	X
Lopes et al. (2011 a)	Santa Catarina	Cambissolo Húmico Aluminíco típico	<i>feller-buncher e skidder</i>	X	X	X	X
Lopes et al. (2011 b)	Mandirituba/ PR	Latossolo Bruno Distrófico típico	<i>Skidder</i>	X	X	X	
Cechim (2007)	Três Barras/SC	Argissolo Vermelho Distrófico	<i>feller e skidder</i>	X	X	X	X
Seixas e Souza (2007)	Itatinga/SP	-	<i>Forwarder</i>	X	X		
Silva et al. (2007)	Santana do Paraíso/MG	Latossolo Amarelo	<i>Forwarder</i>	X	X		
Lopes. S. et al. (2006)	Belo Oriente/MG	Latossolo Vermelho Amarelo	<i>clambunk e tracked-skidder</i>	X	X	X	
Seixas et al. (2003)	Lençóis Paulista/SP	Latossolo Vermelho Amarelo	<i>Forwarder</i>	X	X		X
Fernandes e Souza (2003)	Guanhães/ MG	Latossolo Vermelho Eutrófico	<i>Forwarder</i>	X	X		
Seixas e Oliveira Júnior (2001)	Luiz Antônio e Jacareí/SP	Vários locais de estudo	<i>harvester e forwarder feller-buncher e skidder</i>	X	X	X	

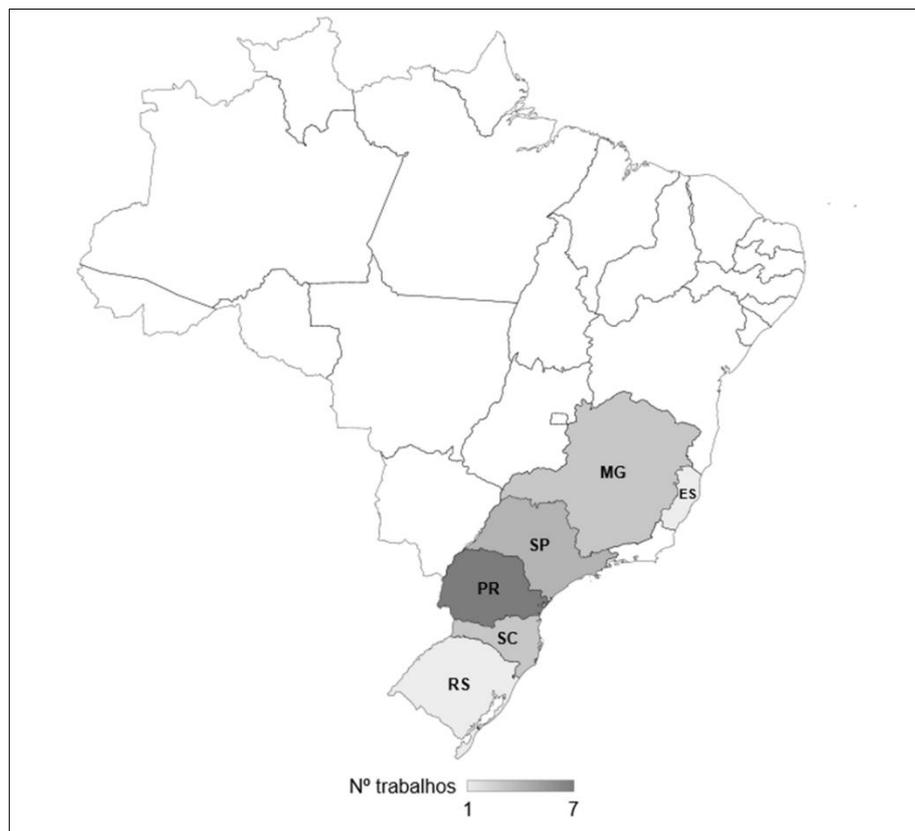
Legenda: Ds: Densidade do solo; RP: Resistência à Penetração do Solo; Pt: Porosidade Total; Ug: Umidade gravimétrica.

Fonte: Autora.

Cabe destacar que para compor este levantamento de referencial teórico, foram selecionados 19 trabalhos. Destes, 94,7% utilizaram o atributo resistência à penetração do solo para avaliar a compactação, enquanto 84,2% levaram em consideração o atributo densidade do solo, ao passo que 57,9% utilizaram o atributo porosidade do solo e apenas 47,4% consideraram a umidade gravimétrica.

A partir da análise da distribuição dos locais de estudo é possível observar que a região sul do país concentra o maior percentual de estudos, com 57,9% do total. O estado do Paraná apresenta o maior número (sete) e o Rio grande do Sul o menor número (um), conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição do número de pesquisas sobre compactação de solos, a partir de colheita florestal mecanizada, nos estados brasileiros



Fonte: Autora.

O atributo que apresentou maior representatividade entre os estudos foi a resistência à penetração, sendo definida como a característica que dificulta o crescimento ou a penetração das raízes no solo. Este é um índice que varia

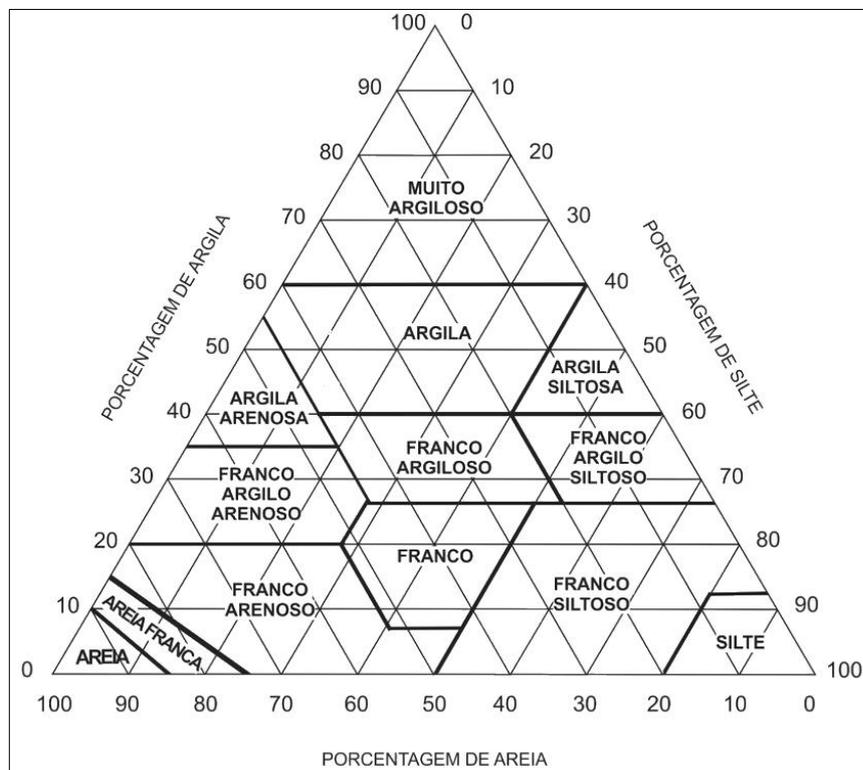
diretamente em função da densidade e tem relação inversa com a umidade do solo (STEFANOSKI et al., 2013; FENNER, 2014).

#### 2.4.1.1 Textura do solo

De acordo Reinert e Reichert (2006), a textura do solo é a proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo, sendo composta por quatro classes de tamanho de partículas (areia grossa - 2 a 0,2 mm; areia fina - 0,2 a 0,05 mm; silte - 0,05 a 0,002 mm e argila - menor do que 0,002 mm), as quais foram determinadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (VAN LIER, 2010).

Com base na porcentagem de cada tipo de partícula (areia, silte e argila) é possível classificar o solo, conforme o triângulo textural (Figura 4), que é dividido em 13 classes texturais.

Figura 4 – Triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do solo para classificação das classes texturais do solo



Fonte: Adaptação de Van Lier (2010).

### 2.4.1.2 Densidade do solo

A densidade do solo é altamente modificada pelo tráfego de máquinas, que ocasiona o seu incremento (RICHART, 2005). Em razão disso, Pires et al. (2011) explicam que o solo é um material poroso, cuja massa pode ocupar volume menor, por causa da compressão, resultando em alterações na estrutura, arranjo e volume dos poros.

Reichert, Reinert e Braida (2003) estipularam, em seu trabalho, os valores críticos teóricos para os parâmetros físicos do solo. Os valores são empíricos, pelo fato de atuarem de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento das plantas. Porém, esses valores auxiliam no diagnóstico da condição física, os quais estão expostos no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores críticos teóricos para os parâmetros físicos do solo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores críticos</b>
Densidade do solo crítica - $D_{sc}$ (impedimento severo)	1,4 – 1,8 Mg.m <sup>3</sup> (função do teor de argila)
	1,4 – 1,6 Mg.m <sup>3</sup> (solo argiloso)
	1,6 – 1,8 Mg.m <sup>3</sup> (solo franco e arenoso)
Resistência à penetração – RP	> 2 Mpa
Porosidade de aeração – EA	EA = 0,10 – 0,15 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
Água disponível às plantas - AD	AD = 0,15 – 0,25 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
Aeração/Porosidade	CC/Pt = 2/3 (0,66) ou EA/Pt = 1/3 (0,34)

Fonte: Adaptação de Reichert, Reinert e Braida (2003).

Para determinar a compactação do solo é utilizado o parâmetro densidade. Porém, Cechim (2007) salienta que o parâmetro mais significativo para a discussão da compactação é a porosidade do solo, visto que tem função direta na proporção de volume do solo, de água e de ar, disponíveis para o desenvolvimento das raízes das plantas.

### 2.4.1.3 Porosidade do solo

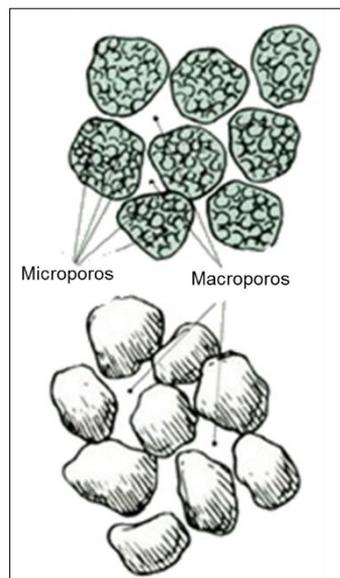
Silva, Cezar e Nóbrega (2011) definem porosidade do solo como o volume de vazios ou o espaço do solo não ocupado por componentes orgânicos e inorgânicos. São cavidades de diferentes tamanhos e formas, determinadas pelo arranjo das

partículas sólidas e constituem a fração volumétrica do solo ocupada com ar e solução.

A porosidade do solo está relacionada com a densidade do solo, pois apresenta relação inversa, ambas com alterações no volume de solo. Os macroporos, ou seja, poros maiores que 50  $\mu\text{m}$ , são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação (REICHERT et al., 2007). Conforme Hillel (1998), os macroporos atuam diretamente na drenabilidade do solo, na capacidade de infiltração e na aeração. Por sua vez, os microporos são encarregados pela retenção de água e solutos.

Os microporos e macroporos são ilustrados na Figura 5. Os solos argilosos possuem grande número de microporos internos nos agregados, diferentemente dos solos arenosos, que não contém poros no interior de seus agregados.

Figura 5 – Representação dos microporos e macroporos



Fonte: Adaptação de Santos (2018).

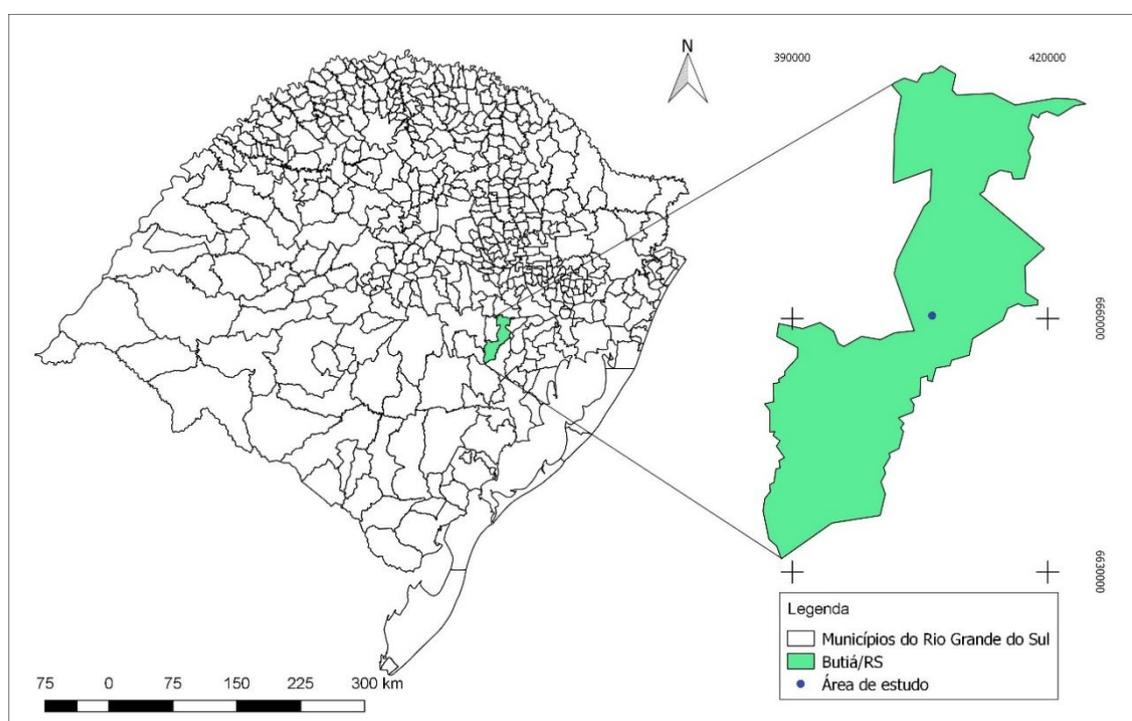
De acordo com Cechim (2007), qualquer fator que tenha influência no espaço poroso do solo tenderá a afetar sua densidade. Isso ocorre porque quanto maior for a proporção de espaço poroso em relação ao volume de sólidos, menor será a densidade do solo. Por outro lado, quanto mais compactado estiver o solo menor será o espaço poroso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

A presente pesquisa foi desenvolvida em uma área com plantio de *Eucalyptus saligna* Smith, no município de Butiá, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 6), com coordenadas geográficas 30°11'5.24''S e 51°58'18.74''W.

Figura 6 – Localização da área de estudo



Fonte: Adaptação de base de dados IBGE (2015).

Para a classificação climática de Köppen, o município caracteriza-se pelo Clima do tipo Subtropical úmido (Cfa), sendo a temperatura média anual de 23° C, com índice pluviométrico anual de, aproximadamente, 1.652,6 mm (WREGGE et al., 2012) e a insolação de 2.300 horas.ano<sup>-1</sup> (MORENO, 1961). Conforme o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2002), a vegetação é classificada com Campos subarbustivos do Escudo Sulriograndense.

O solo da região pertence à Unidade de Mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (STRECK et al., 2002).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local desse estudo, antes de ser incorporado o sistema de produção florestal, era utilizado para fins de produção agrícola. O plantio de *Eucalyptus saligna* Smith (Tabela 1) foi realizado no ano de 2008, com espaçamento de 2,5 m x 3,0 m. O primeiro desbaste ocorreu no quarto ano, em desbaste seletivo, no qual o corte das árvores foi realizado com motosserra e a extração conduzida com tração animal.

Tabela 1 – Características do povoamento em estudo, localizado em Butiá, RS

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>
Espécie	<i>Eucalyptus saligna</i>
Ciclo de rotação	Primeiro
Idade no levantamento de dados (anos)	10
DAP médio (cm)	23,35
Altura média (m)	20,7
Rotação final (anos)	20

Fonte: Autora.

No povoamento de *Eucalyptus saligna* (Figura 7), foram demarcados dois locais de estudo, com dimensões de 15 m x 50 m.

Figura 7 – Ilustração do povoamento florestal e demarcação da área de estudo



Fonte: Autora.

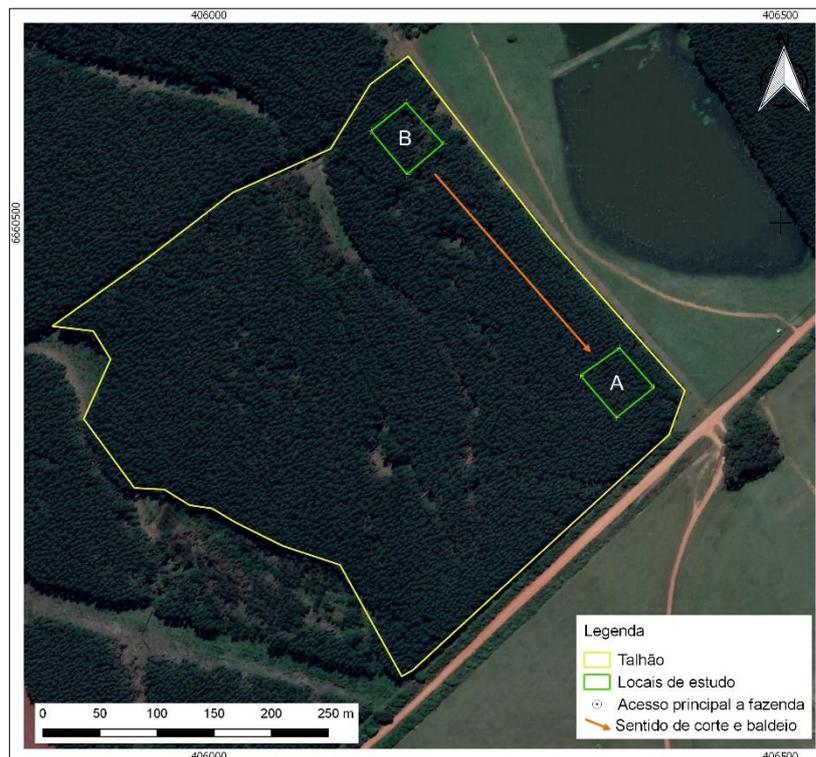
Nestes locais, realizou-se o levantamento das seguintes variáveis:

- a) Inventário florestal: número de árvores, diâmetro e altura;
- b) Biomassa florestal: quantidade de resíduos sob o solo ao longo dos anos;
- c) Atributos físicos do solo: microporosidade, macroporosidade e densidade do solo.

### 3.2.1 Descrição dos locais de estudo

Foram determinados dois locais de estudo, ambos de 45 x 50 metros, localizados nas mesmas linhas de corte (Figura 8), separados por uma distância de aproximadamente 230 metros.

Figura 8 – Localização das áreas de estudo no talhão



Fonte: Autora.

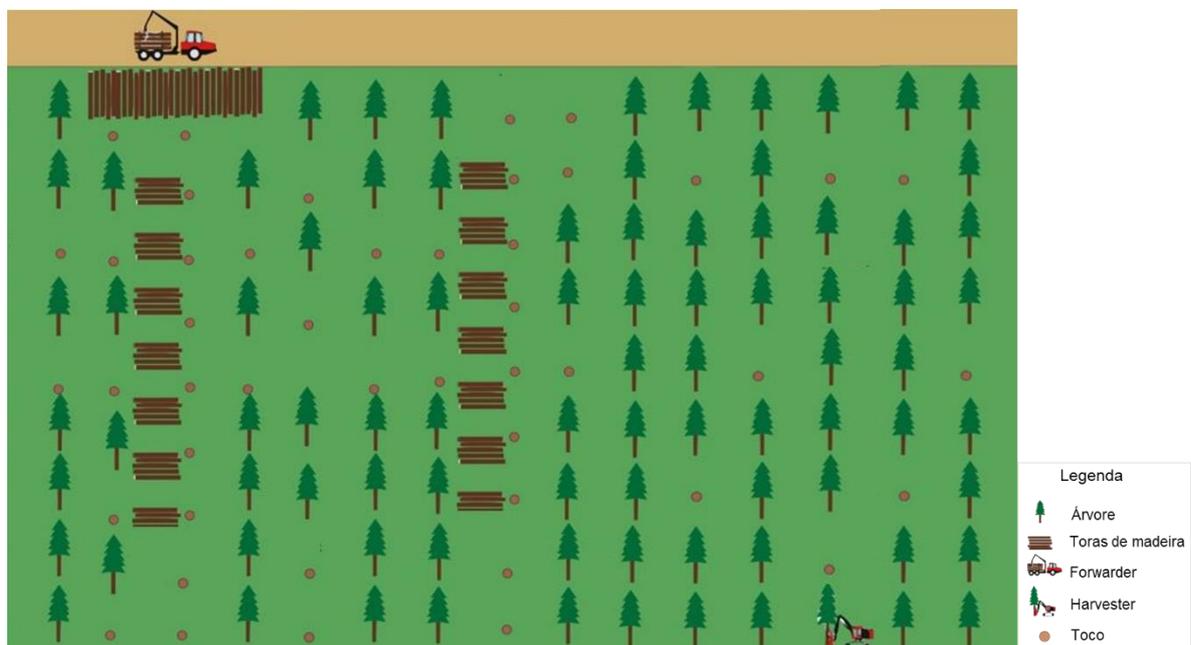
Os locais demarcados foram estabelecidos na terceira sequência de linha rasa, por razão da ordem de operação, que inicia na extremidade direita do talhão (próximo ao local B) e finaliza na parte superior, próxima a área A e a estrada. Não foi alocado

entre os locais pois já havia demarcação de unidade amostral de acompanhamento contínuo da empresa, nem lado a lado porque é inviável operacionalmente.

### 3.2.2 Sistema de desbaste

De acordo com o plano de manejo do talhão de estudo, na área estavam previstas duas operações de desbaste seletivo (que consiste na retirada de árvores, segundo características pré-estabelecidas no plano de manejo), assim como um desbaste sistemático (no qual não se considera a classe de copa e a qualidade das árvores), realizado de forma mecanizada, com a retirada de uma linha de árvores a cada quatro linhas, o que auxiliou o acesso da máquina ao interior no talhão. A Figura 9 ilustra os procedimentos adotados na área, que já possui uma intervenção de desbaste seletivo e o desbaste mecanizado seletivo-sistemático.

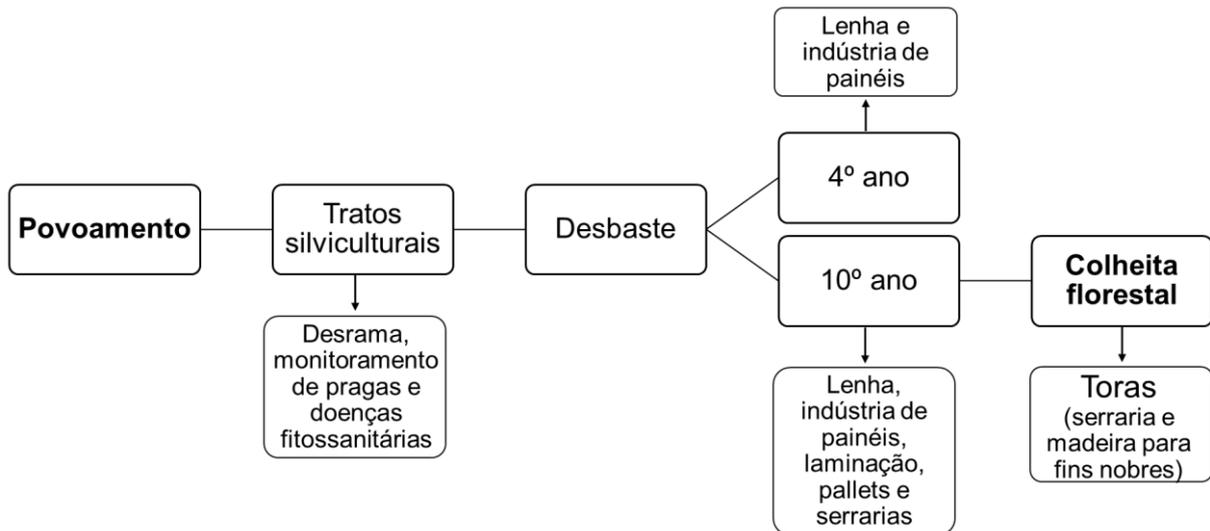
Figura 9 – Esquema da operação de desbaste utilizado



Fonte: Autora.

A Figura 10 apresenta o fluxograma das operações empregadas no talhão em estudo. No quarto ano ocorreu a primeira intervenção de desbaste seletivo, com corte por motosserra e o baldeio com tração animal. O segundo desbaste foi empregado no décimo ano, com sistema mecanizado de desbaste sistemático e seletivo.

Figura 10 – Fluxograma das operações do talhão em estudo, englobando o período de implantação (2008) até o segundo desbaste (2018)



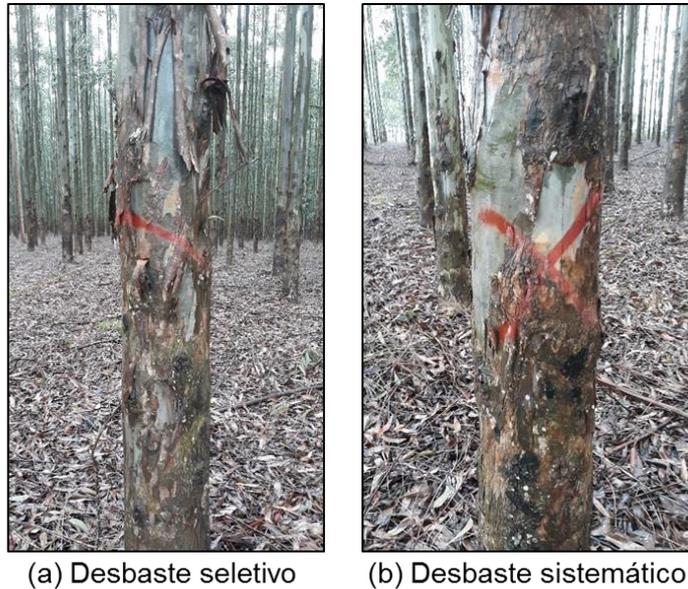
Fonte: Autora.

### 3.2.3 Inventário florestal

No censo, foram mensurados o diâmetro e a altura, assim como foi identificada, na planilha, qual a operação que cada indivíduo sofreria, sendo elas: retirada pelo desbaste seletivo (Figura 11a), retirada pelo desbaste sistemático (Figura 11b). As que devem permanecer na floresta não recebem marcação.

Após o censo, foram contabilizados os indivíduos nos locais A e B, que totalizaram 210 e 165 árvores, respectivamente. Assim, calculado o percentual de indivíduos removidos por tipo de operação. No local A, 44% permanecem na floresta, 35% sofreram desbaste seletivo e 21% o desbaste sistemático, ao passo que no local B, foram de 49%, 31%, 20% para as mesmas operações, respectivamente. O inventário foi utilizado, também, para que a partir do diâmetro médio das árvores do desbaste seletivo e sistemático, fossem selecionadas seis árvores para o corte e o seccionamento de discos para determinar a densidade da madeira.

Figura 11 – Demarcação das árvores que foram cortadas pelo: (a) desbaste seletivo; (b) sistemático



Fonte: Autora.

### 3.2.4 Densidade da madeira

A densidade da madeira foi obtida, conforme a metodologia da NBR 11941(2003), que considera a relação da massa seca e o respectivo volume de madeira acima do ponto de saturação das fibras (Equação 1).

$$d_b = \frac{m_3}{(m_2 - m_1)} \quad (1)$$

Onde:  $d_b$  é a densidade básica da madeira, em  $\text{g.m}^{-3}$ ;

$m_3$  é a massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ , em g;

$m_2$  é a massa do recipiente com água e disco imerso, em g;

$m_1$  é a massa do recipiente com água, em g.

Para determinar a densidade básica, foram retirados seis discos de cada árvore, na proporção de 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% (Figura 12) da altura comercial. As árvores utilizadas foram escolhidas, conforme a média do inventário realizado, sendo quatro indivíduos representantes do desbaste seletivo e dois indivíduos do desbaste sistemático, totalizando seis árvores.

Figura 12 – Discos para determinação da densidade da madeira



Fonte: Autora.

### 3.2.5 Biomassa florestal residual

A biomassa florestal residual (galhos secos e folhas secas) foi quantificada em três parcelas por local de estudo, de forma aleatória, com área amostral de 2,25 m<sup>2</sup>. O método utilizado para determinação de biomassa foi o direto (SANQUETTA e BALBINOT, 2004), sendo que a biomassa residual foi coletada a campo e pesada, para verificar o peso úmido (Figura 13a). Posteriormente, em laboratório, houve a transferência para sacos de papel e secos em estufa, regulada em 65 °C (Figura 13b). Após 72 horas de secagem ocorreu a primeira pesagem. As demais pesagens foram realizadas até encontrar o peso constante.

Figura 13 – Procedimentos: (a) pesagem da biomassa úmida; (b) sacos de papel com a biomassa residual para pesagem



(a) Pesagem da biomassa residual úmida



(b) Sacos de papel com a biomassa residual para pesagem

Fonte: Autora.

Magalhães et al. (2011), afirmam que o impacto negativo ocasionado pela massa das máquinas no solo são minimizadas pela presença de biomassa sobre o solo. Sendo assim, neste estudo, foi quantificada a biomassa acumulada sobre o solo, com valores médios de 18,74 Mg.ha<sup>-1</sup> para o local A e 20,22 Mg.ha<sup>-1</sup> para o local B.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MÁQUINAS UTILIZADAS NO ESTUDO

#### 3.3.1 Corte e processamento

A máquina de corte utilizada foi a de base de esteira (empregada em operações de terraplanagem), adaptada para operações florestais, marca Hyundai modelo 160 (Figura 14). Apresenta motor Cummins QSB4.5 tier III, com 130 HP de potência, com altura máxima de 2.980 mm, largura 2,490 mm, largura das esteiras de 500 mm e comprimento da grua de 5100 mm. É constituída de 4.980 kg de massa de chassi superior, 1.250 kg da grua e 17.550 kg da sapata, totalizando 23.780 kg. Em sua adaptação foi instalado um cabeçote processador, da marca Log Max, modelo 6000B, com massa de 1.306 kg.

Figura 14 – Máquina utilizada no corte e processamento



(a) Máquina base da Hyundai



(b) Cabeçote da Log Max

As operações realizadas pela máquina compreendem a derrubada, desgalhamento, destopamento e traçamento das árvores selecionadas. Ademais, a máquina deposita as toras em pilhas ao seu lado esquerdo, na quinta linha rasa. Ao longo desta, são dispostos os galhos e resíduos, cujo material serve como cobertura para a passada da máquina.

### 3.3.2 Baldeio

O baldeio da madeira foi realizado por um trator agrícola, com reboque e grua (TACRG). Foi utilizado um trator Valtra (Figura 15), linha BH, modelo 180, 4x2 TDA, motor AGCO power 620 DS, potência de motor de 139 kW, com 6 cilindros, massa máxima permitida de 10.584 kgf e com comprimento total do trator de 5,5 metros. O trator contava com a capacidade máxima de lastro metálico, correspondente a 1.380 kg.

Figura 15 – Trator Valtra utilizado no baldeio da madeira



Fonte: Autora.

Foi utilizado um reboque com grua para carregamento, da fabricante Penzsaure (Figura 16), modelo 7.60W, compartimento de carga de 8,4 metros de comprimento total. Tem capacidade de 12 toneladas de carga e comprimento útil é de seis metros e volume de cargas de 18,9 m<sup>3</sup>. Acoplado com grua L30, com capacidade de sete

toneladas e com comandos por *joystick*, acoplada a tomada do controle remoto do trator. A massa bruta total do conjunto reboque e grua foi de 6.500 kg.

Figura 16 – Reboque com grua da fabricante Penzsaaur



Fonte: Autora.

### 3.4 OS TRATAMENTOS

Cada local (A e B) foi composto por uma linha de corte raso (desbaste sistemático) com duas linhas de árvores em cada lado. Foram aleatorizados três tratamentos com três repetições cada (Apêndice A). Os tratamentos compreendem: T<sub>0</sub> - sem tráfego; T<sub>1</sub> - após o corte (passada do *harvester*); T<sub>2</sub> - após o baldeio com carga completa (Figura 17) (passada do trator agrícola com reboque e grua). Para a avaliação dos efeitos da compactação, foram realizadas análises físicas do solo, conforme o item 3.5.

A madeira oriunda do desbaste foi destinada a uma fabricante de *pellets*, na qual os picadores requerem diâmetros limites. Assim, as toras foram seccionadas em dois comprimentos, sendo: diâmetro de 19 a 22 cm com comprimento de 2,2 metros e toras com diâmetro menor que 19 cm, comprimento de 2,7 metros. Também, foram separadas as toras de seis metros de comprimento e com maiores diâmetros, normalmente árvores de bordadura. Ademais, as pontas finas e árvores com alguma injúria que prejudiquem a comercialização, foram destinadas como lenha.

Figura 17 – Representação do baldeio com carga completa



Fonte: Autora.

Foram realizadas seis passadas do trator agrícola com reboque e grua (TACRG) na quinta linha rasa. O número de passadas foi determinado em função do processo operacional, do sortimento das toras e do comprimento da trilha no interior do talhão. Para a retirada da madeira do interior, esse é o número mínimo de passadas, conforme informado pelo gestor responsável.

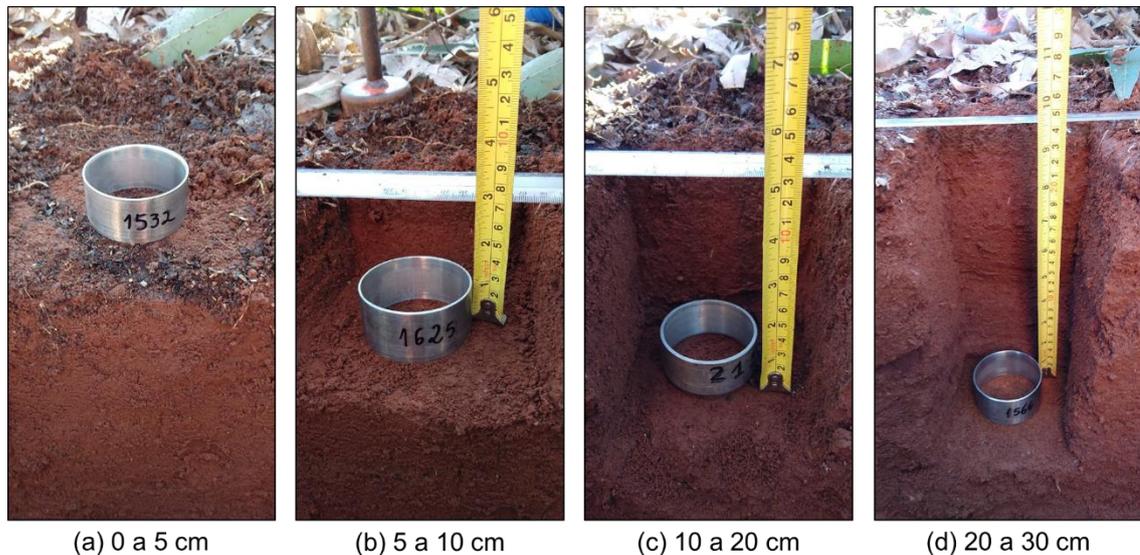
O baldeio seguiu as orientações do gestor de campo. Conforme as operações dos dias anteriores, foi definida a utilização de toras de 2,7 metros para compor a carga avaliada, de maneira que fossem identificadas nas pilhas, mensurados os seus comprimentos e diâmetros (ponta fina e ponta grossa), com o uso de tinta azul para demarcar as toras utilizadas e, com isso, orientar o operador da grua no momento do carregamento. Foram contabilizadas 182 toras na carga (Figura 18), o que corresponde a 16,77 m st ou 10,20 toneladas. Conforme as especificações técnicas do fabricante, o limite para o compartimento de carga é 18,9 m st ou 12 toneladas. Essa aferição da carga foi realizada por meio do volume de madeira transportado, conforme o número de toras e as mensurações (diâmetros, comprimento e densidade da madeira).

### 3.5 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

As avaliações das propriedades físicas do solo foram realizadas em três momentos, nas linhas de tráfego de máquinas (quinta rasa), a saber: antes do tráfego (testemunha), após o corte (*harvester*) e após o baldeio da madeira (passada do trator adaptado).

Para avaliar os atributos de textura, densidade e porosidade do solo, foram abertas trincheiras. As coletas foram realizadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm (Figura 18). Essas profundidades foram optadas com base no estudo de compactação em solo florestal de Szymczak (2013), cujos resultados destacam que as principais alterações nas propriedades físicas do solo acontecem até a camada de 30 cm de profundidade.

Figura 18 – Profundidades de avaliação do solo em camadas: (a) 0 a 5 cm; (b) 5 a 10 cm; (c) 10 a 20 cm; (d) 20 a 30 cm



Fonte: Autora.

#### 3.5.1 Granulometria do solo

A granulometria do solo foi analisada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017). As amostras foram coletadas nas mesmas profundidades dos anéis volumétricos, sendo retiradas aproximadamente 100 gramas de solo com estrutura deformada.

Dessa forma, as amostras foram identificadas e encaminhadas ao laboratório para processamento e análise.

Esse método é baseado na velocidade de queda das partículas que compõem o solo, de maneira que seja fixado o tempo para o deslocamento vertical na suspensão do solo com água, após a adição de um dispersante químico (NaOH). Para a determinação de argila, foi pipetado um volume da suspensão e secado em estufa para posterior pesagem. As frações grosseiras (areia fina e grossa) foram separadas por tamisação, secadas em estufa e pesadas. A silte é obtida pela diferença das outras frações (argila+areias) em relação à amostra original. Assim, podem ser obtidas as quantidades em cada fração. A Tabela 2 representa a constituição da relação da quantidade em cada classe de partícula (areia grossa, areia fina, silte e argila).

Tabela 2 – Granulometria do solo em cada camada avaliada para os dois locais no povoamento de *Eucalyptus saligna*

Local	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila
		(g kg <sup>-1</sup> )				
A	0 a 5	470,2	180,4	650,6	212,4	137,1
	5 a 10	453,8	212,6	666,4	216,7	116,9
	10 a 20	498,2	151,8	649,9	172,6	177,5
	20 a 30	382,6	165,3	547,8	193,4	258,8
<b>A</b>	<b>Média</b>	<b>451,2</b>	<b>177,5</b>	<b>628,7</b>	<b>198,8</b>	<b>172,5</b>
B	0 a 5	333,8	117,4	451,2	268,3	280,5
	5 a 10	370,7	183,1	553,8	207,5	238,7
	10 a 20	466,5	15,1,0	617,4	205,5	177,1
	20 a 30	251,5	113,0	364,5	191,5	444,0
<b>B</b>	<b>Média</b>	<b>355,6</b>	<b>141,1</b>	<b>496,7</b>	<b>218,2</b>	<b>285,1</b>

Fonte: Autora.

Para a variável umidade gravimétrica do solo, nos locais de estudos A e B, foi obtido o valor médio de 0,33 kg kg<sup>-1</sup> e 0,38 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Cabe destacar que o local A apresentou 0,33 kg kg<sup>-1</sup> na camada de 0 a 5 cm, e o local B, 0,39 kg kg<sup>-1</sup>, para a mesma camada. As demais camadas apresentaram valores próximos da média.

### 3.5.2 Densidade e porosidade do solo

As coletas de solo foram executadas por meio do método de anel volumétrico (MAV), que consiste na amostragem de solo com a estrutura indeformada em anel cilindro metálico de volume conhecido. Para Pires et al. (2011), este é o método considerado padrão e o mais utilizado para determinar a densidade e a porosidade do solo. Os anéis volumétricos (Apêndice B) foram isolados com plástico filme para preservar o torrão de solo e, assim, transportados ao laboratório para a análise, conforme a metodologia descrita por EMBRAPA (2017). No local, foram saturados e dispostos à coluna de areia, com tensão de 6 kPa para determinar a microporosidade. Posteriormente, as amostras foram colocadas em estufa até obterem o peso constante e, como resultado, o peso seco, a fim de determinar a densidade do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença da porosidade total e a microporosidade.

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento estatístico utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC) de arranjo bifatorial com parcelas subdivididas, sendo o primeiro fator o local de estudo (A e B) e o segundo fator os tratamentos (parcela subdividida) – sem tráfego, após o corte e após o baldeio.

As análises foram realizadas em camadas (0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm). Os dados foram submetidos ao teste de *Shapiro Wilk*, com o intuito de verificar a normalidade dos dados e ao teste de *Bartlett*, a fim de verificar a homogeneidade das variâncias. Para a comparação de médias foi utilizado o teste de *Tukey* a 0,05 de significância, para os atributos físicos do solo avaliados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Na análise bifatorial dos atributos físicos do solo, foi constatado efeito do local para todas as camadas avaliadas no atributo densidade e microporosidade do solo, ao passo que, para o atributo macroporosidade do solo, o efeito do local ocorreu apenas na camada de 0 a 5 cm.

#### 4.1.1 Densidade do solo

O desbaste mecanizado teve efeito sobre o solo, nas condições avaliadas desse estudo, evidenciando que o tráfego de máquinas ocasiona a compactação. A camada de 0 a 5 cm apresentou diferença significativa entre os tratamentos para os dois locais (Tabela 3). O local A teve aumento de 4,39% após o corte ( $T_1$ ) e 8,19% após o baldeio ( $T_2$ ), comparados com a condição sem tráfego ( $T_0$ ), enquanto que no local B, o maior efeito esteve concentrado no tratamento após o baldeio ( $T_2$ ), com aumento de 11,85% em relação ao  $T_0$ .

O local A não apresentou diferença significativa entre os tratamentos na camada de 5 a 10 cm. Porém, para a mesma camada, no local B, houve diferença significativa, com o acréscimo do valor médio de 8% na densidade do solo, após o baldeio ( $T_2$ ), em referência ao  $T_0$ . Sampietro, Lopes e Reichert (2015) argumentam que as alterações na densidade do solo, mesmo as pequenas, são acarretadas pelo tráfego e constituem consequências negativas, a exemplo da redução da porosidade e do fluxo de água no solo.

Após a análise dos tratamentos dentro de cada local, foi verificado que nas camadas de 10 a 20 cm e 20 a 30 cm não houve diferença significativa (Tabela 3). Logo, é possível afirmar que as camadas mais profundas possuem menor alteração nas propriedades físicas, em decorrência do tráfego de máquinas. O estudo de Szymczak et al. (2014) evidencia que a colheita florestal causa a compactação, nas linhas de tráfego das máquinas, numa profundidade de até 10 cm. Nesse sentido, Sampietro, Lopes e Reichert (2015) ressaltam que a deterioração física, decorrente das operações de colheita florestal mecanizada, é mais intensa na camada superficial.

Tabela 3 – Valores médios da densidade do solo ( $\text{Mg.m}^3$ ) em povoamento de *Eucalyptus saligna* com 10 anos de idade

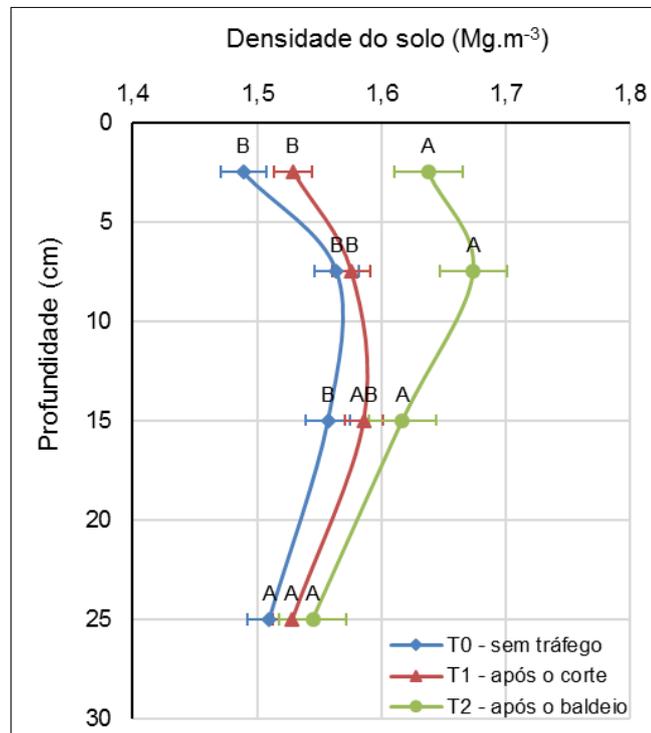
<b>Densidade do solo (<math>\text{Mg.m}^3</math>) - camada 0 a 5 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	1,527 Ba	1,594 Aba	1,652 Aa	1,606 a	2,57
<b>Local B</b>	1,452 Ba	1,464 Bb	1,624 Aa	1,541 b	
Média	1,489 B	1,529 B	1,638 A		
CV%	3,46				
<b>Densidade do solo (<math>\text{Mg.m}^3</math>) - camada 5 a 10 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	1,650 Aa	1,675 Aa	1,752 Aa	1,707 a	3,24
<b>Local B</b>	1,477 Bb	1,478 Bb	1,595 Ab	1,536 b	
Média	1,564 B	1,576 B	1,674 A		
CV%	2,50				
<b>Densidade do solo (<math>\text{Mg.m}^3</math>) - camada 10 a 20 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	1,652 Aa	1,691 Aa	1,707 Aa	1,689 a	2,37
<b>Local B</b>	1,463 Ab	1,480 Ab	1,527 Ab	1,499 b	
Média	1,557 B	1,586 AB	1,617 A		
CV%	2,95				
<b>Densidade do solo (<math>\text{Mg.m}^3</math>) - camada 20 a 30 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	1,596 Aa	1,616 Aa	1,629 Aa	1,617 a	3,43
<b>Local B</b>	1,424 Ab	1,441 Ab	1,46 Ab	1,446 b	
Média	1,510 A	1,528 A	1,545 A		
CV%	3,81				

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05. (T<sub>0</sub> - sem tráfego, T<sub>1</sub> - após o corte, T<sub>2</sub> - após o baldeio); CV - coeficiente de variação.

Fonte: Autora.

Diante das médias dos tratamentos apresentados na Tabela 3, houve a comparação entre tratamentos a partir de cada camada de solo avaliada, de maneira a demonstrar uma diferença significativa, resultante do efeito de duas passadas de *harvester* e seis passadas TACRG, até a camada de 20 cm (Figura 19). Streck (2004), em seu estudo avaliou a pressão exercida pelo tráfego de máquina de 10Mg, com duas passadas e com quatro passadas em área agrícola, verificando que na camada de 0 a 15 cm ocorreu o aumento da densidade do solo em relação ao tratamento sem compactação. Esse resultado corrobora com o presente estudo. Da mesma forma, Jesus et al. (2015) concluíram que o impacto do tráfego do *forwarder* em solo sem camada de resíduos promove redução na qualidade física do solo, cujos efeitos negativos perduraram até o final da rotação seguinte.

Figura 19 – Representação dos valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de *Eucalyptus saligna*



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Fonte: Autora.

A figura aponta para o fato de que há compactação no solo, porque o incremento de densidade após o baldeio ( $T_2$ ) nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm, ultrapassaram a densidade considerada crítica para solos argilosos, que varia de 1,40 a 1,60  $\text{Mg.m}^{-3}$ , descritos por Reichert, Reinert e Braida (2003).

No presente estudo, foi observado um acréscimo de 8,5% na camada superficial e 3,1% na camada mais profunda, considerando os valores médios após o baldeio ( $T_2$ ) com a condição sem tráfego ( $T_0$ ). Lima et al. (2000) analisaram o impacto no solo, provocado pelo tráfego do *feller buncher* e do *skidder* e concluíram que houve um acréscimo de 19,6% na densidade do solo nos primeiros 10 cm de profundidade. Além disso, Gaggero, Trein e Ippoliti (2002) verificaram que o pisoteio de gado ocasiona algumas alterações nas propriedades físicas de densidade e porosidade do solo na camada superficial.

Sampietro e Lopes (2011) realizaram uma simulação de tráfego com uma passada de *feller-buncher* e 1, 3, 5, 10 e 15 passadas de *skidder* e constataram que

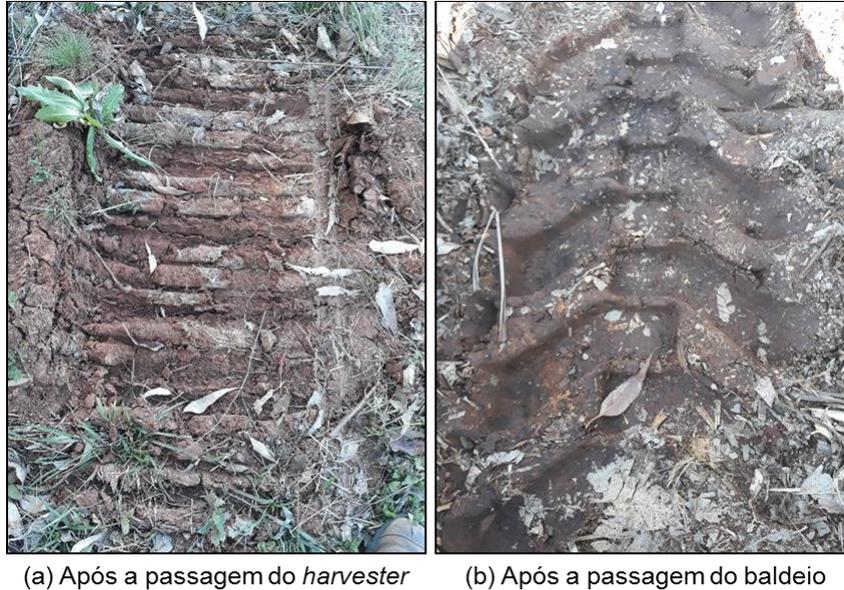
83,0% do aumento total da densidade ocorreu após uma passada do *feller-buncher* e uma do *skidder*. Ademais, os autores ressaltam que a camada superficial de 0 a 15 cm apresenta grande susceptibilidade às alterações promovidas pelo tráfego das máquinas e, quando comparada com as camadas mais profundas, o incremento é 56,0% menor. Em seus estudos, Sampietro, Lopes e Reichert (2015) destacaram que o incremento da densidade na camada superficial do solo (0 a 15 cm) foi 73,4 % maior, quando comparada com as camadas mais profundas. Szymczak (2013) argumenta que pode ocorrer a dissipação da pressão aplicada pelo tráfego das máquinas no solo, não atingindo as camadas mais profundas em nível considerável, o que corrobora com as considerações de Sampietro, Lopes e Reichert (2015).

A partir do estudo de Cechim (2007), em avaliação da compactação em Argissolo Vermelho Distrófico típico, foi constatado que após três ciclos operacionais de *skidder*, os valores de densidade inicial ficam acima do nível crítico em todas as camadas. Esse fato pode estar correlacionado com a soma das massas da máquina e das árvores. O mesmo pode ser observado por Silva et al. (2007) destacam que o número de passadas da máquina e a massa de madeira transportada pode ter relação com o grau de compactação do solo. Ao estudar o efeito da intensidade de tráfego de um *forwarder*, modelo Valmet 636 S e com 8 m<sup>3</sup> de madeira, conseguiram demonstrar a compactação nas profundidades de 0 a 10 cm (com oito passadas) e de 10 a 20 cm (com quatro passadas).

Posteriormente, Silva et al. (2007) avaliaram o efeito do aumento da carga (0, 4, 8 e 12 m<sup>3</sup> de madeira). Entretanto, nesse aspecto não foi verificado o efeito sobre a densidade do solo, apenas foi observado que a densidade do solo foi 9,9% e 11,7% maior em relação ao tratamento sem tráfego, respectivamente, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Isso pode ser justificado pela afirmação de Silva et al. (2007, apud Greacen e Sands, 1980), na qual consideram que o acréscimo da carga não aumenta, necessariamente com a compactação, visto que pode ocorrer aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga.

Neste estudo, não foi realizada a mensuração da superfície de contato pneu/solo. Apesar disso, a Figura 20 ilustra que a pressão dos rodados sobre o solo ocasionou numa impressão nítida do rastro, tanto após a passagem da esteira do *harvester* quanto e, principalmente, após a passagem do baldeio, com sulcos do pneu demarcados no solo. Em ambos os casos, são pequenas áreas da quinta rasa, nas quais o solo estava descoberto pelo resíduo do processamento das árvores colidas.

Figura 20 – Representação ilustrativa do solo na trilha de tráfego: (a) após a passagem do harvester; (b) após a passagem do baldeio



Fonte: Autora.

Em colheita florestal de *Eucalyptus saligna*, Sampietro (2013) verificou que com uma passada do *harvester* e quatro passadas do *forwarder*, já ocorreram alterações em todas as propriedades e parâmetros avaliados (densidade, distribuição de tamanhos de poros, curva de retenção de água, resistência do solo à penetração, grau de compactação, condutividade hidráulica do solo saturado, compressibilidade), enquanto que os estudos de Pereira et al. (2019), ao avaliarem os atributos físicos em área com eucaliptos mortos e com árvores vivas, demonstraram diferenças significativas quanto aos atributos de densidade do solo, porosidade do solo, curva de retenção e condutividade hidráulica do solo.

Oliveira Junior, Souza e Melo (2010) ressaltam, em estudo com atributos físicos do solo, que o coeficiente de variação é uma importante ferramenta para análise da dispersão dos dados por se configurar como uma medida relativa ao valor médio da série, o que possibilita comparar dados com unidades de medida e médias diferentes.

Para Warrick e Nielsen (1980), que relacionam os CV com a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, consideram que:  $CV < 12\%$  - baixo; de  $12\% < CV < 60\%$  - médio; e  $CV \geq 60\%$  - alto). Levam em conta o valor de CV alto maior que

60%, pelo fato de os atributos físicos possuem variabilidade no solo, mesmo em solos com características homogêneas.

De outro modo, Gomes e Garcia (2002) analisaram o coeficiente no conjunto de experimentos agrícolas e florestais, de maneira a estabelecer como:  $CV < 10\%$  - baixo; quando  $10\% < CV < 20\%$  - médio; de  $20\% < CV < 30\%$  - alto e  $CV > 30\%$  - muito alto. Essa classificação foi adaptada com base no estudo de Pimentel Gomes (1985). O Quadro 3 aponta que o atributo de densidade do solo ( $D_s$ ) e os coeficientes de variação do presente estudo obtiveram a mesma classificação, pois os valores de CV não ultrapassaram 10%.

Quadro 3 – Classificação do coeficiente de variação no atributo de densidade do solo

	<b>Warrick e Nielsen (1980) e para Gomes e Garcia (2002)</b>			
<b>Camadas de solo</b>	<b>0 a 5 cm</b>	<b>5 a 10 cm</b>	<b>10 a 20 cm</b>	<b>20 a 30 cm</b>
<b>Local</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
<b>Tratamento</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Fonte: Autora.

A partir da consideração relacionada ao fato de que os dados apresentaram baixo coeficiente de variação para a  $D_s$ , é possível afirmar que possuem eficiência e exatidão, assim como pode ser observado nos CV dos estudos realizados por Amaro Filho et al. (2007), Cechim (2007), Rodrigues (2013), Szymczak (2013), Sampietro (2013), Szymczak (2015) e Rodrigues et al. (2018), os quais foram classificados como baixo. Garcia (1989) ressalta que quanto menor o CV, mais homogêneos são os dados.

#### **4.1.2 Macroporosidade do solo**

No processo de compactação do solo, uma das principais consequências é a redução dos macroporos. Para Seixas (1988), esse atributo é responsável por drenar rapidamente o solo após uma chuva ou irrigação, além da aeração. Essa redução foi constatada neste estudo (Tabela 4), nas camadas de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm, porém foi significativo apenas no local B, de ambas as camadas. Na camada de 0 a 5 cm, houve redução de 53,64% após o baldeio ( $T_2$ ), em relação ao sem tráfego ( $T_0$ ), enquanto que, na camada de 5 a 10 cm, os valores de macroporos diminuíram 29,17% após o

baldeio (T<sub>2</sub>). Szymczak (2013) observou a redução de 60 a 50% nos valores de macroporosidade pelas máquinas florestais *harvester* e *forwarder*, em seu estudo de compactação do solo em colheita de *Pinus taeda*.

Tabela 4 – Valores médios da macroporosidade do solo (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) em povoamento de *Eucalyptus saligna* com 10 anos de idade

<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) - camada 0 a 5 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,182 Aa	0,156 Aa	0,128 Aa	0,148 a	28,21
<b>Local B</b>	0,151 Aa	0,142 Aba	0,070 Bb	0,108 b	
Média	0,166 A	0,149 A	0,099 B		
CV%	24,24				
<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) - camada 5 a 10 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,128 Aa	0,128 Aa	0,11 Aa	0,119 a	17,44
<b>Local B</b>	0,144 Aba	0,150 Aa	0,102 Ba	0,125 a	
Média	0,136 A	0,139 AB	0,106 B		
CV%	21,13				
<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) - camada 10 a 20 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,114 Aa	0,122 Aa	0,115 Aa	0,116 a	23,05
<b>Local B</b>	0,167 Aa	0,146 Aa	0,116 Aa	0,136 a	
Média	0,140 A	0,134 A	0,115 A		
CV%	13,18				
<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) - camada 20 a 30 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,128 Aa	0,149 Aa	0,119 Aa	0,128 a	14,85
<b>Local B</b>	0,152 Aa	0,148 Aa	0,133 Aa	0,142 a	
Média	0,140 A	0,148 A	0,126 A		
CV%	13,04				

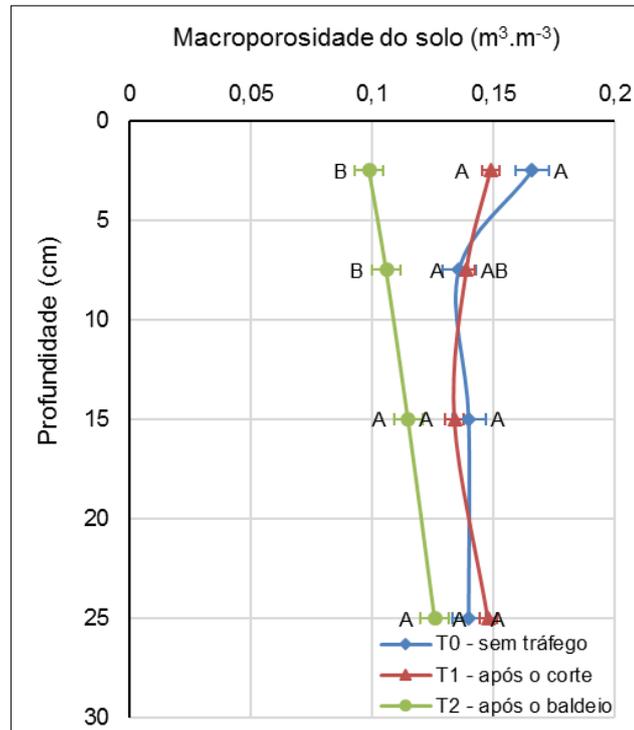
Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05. (T<sub>0</sub> - sem tráfego, T<sub>1</sub> - após o corte, T<sub>2</sub> - após o baldeio); CV - coeficiente de variação.

Fonte: Autora.

No tratamento T<sub>2</sub>, os valores de macroporos foram de 0,070 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> na primeira camada e 0,102 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> na segunda camada. Estes valores estão abaixo do valor limite de 0,10 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>, citado pelos autores Cechim (2007, apud Vomocil e Flocker, 1961) e Reichert et al. (2009), e já pode ser considerado prejudicial ao crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas.

Nas camadas de 10 a 20 cm e de 20 a 30 cm, não houve efeito do local e dos tratamentos, mesmo assim é possível observar a redução dos valores de macroporos com o tráfego de máquinas (Figura 21).

Figura 21 – Representação dos valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de *Eucalyptus saligna*



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Fonte: Autora.

Gontijo et al. (2008) verificaram que as pressões aplicadas pelas máquinas ocasionam em transformação dos macroporos em microporos. Esse processo também é citado por Seixas (1997), quando ressalta que a água fica retida nos microporos sob maiores tensões e, assim, pode estar indisponível para as plantas.

Para Klein e Libardi (2002), a transformação de macroporos em microporos indica-se como um dos efeitos decorrentes da compactação do solo. Isso, associado com o incremento na densidade do solo, pode levar às modificações no processo de difusão de gases. Seixas (1997) relata que quando houverem valores menores de 10% para macroporos, a difusão de gases pode ser nula no solo. Os macroporos são altamente modificados e indicam uma redução na aeração do solo, assim como o

aumento na densidade do solo, o que acarreta, conseqüentemente, na sua compactação (Almeida, 2009; Drescher, 2011). Para Silva, Cezar e Nóbrega (2011), o volume e a dimensão dos poros devem ser adequados para atenderem às necessidades da cultura, tais como: a entrada, o movimento e as retenções de água e ar no solo.

Tormena et al. (2002) esclarecem que os valores de macroporosidade abaixo de 15%, já podem considerados como restritivos para o crescimento e a produtividade das plantas, mesmo que haja a dependência da espécie e da atividade biológica do solo. Debiasi (2008) constatou que, após o tráfego de máquinas, os poros orientaram-se paralelamente à superfície do solo, sem continuidade vertical, resultando em poros menos efetivos para a infiltração de água e para o desenvolvimento radicular em profundidade.

Quanto aos coeficientes de variação (CV), no atributo de macroporosidade do solo, as classificações de Warrick e Nielsen (1980) e Gomes e Garcia (2002) foram distintas, conforme exposto no Quadro 4.

Quadro 4 – Classificação do coeficiente de variação no atributo de macroporosidade do solo

	<b>Warrick e Nielsen (1980)</b>			
<b>Camadas de solo</b>	<b>0 a 5 cm</b>	<b>5 a 10 cm</b>	<b>10 a 20 cm</b>	<b>20 a 30 cm</b>
<b>Local</b>	Médio	Médio	Médio	Médio
<b>Tratamento</b>	Médio	Médio	Médio	Médio
	<b>Gomes e Garcia (2002)</b>			
<b>Local</b>	Alto	Médio	Alto	Médio
<b>Tratamento</b>	Alto	Alto	Médio	Médio

Warrick e Nielsen (1980): CV < 12% - baixo; de 12% < CV < 60% - médio; e CV ≥ 60% - alto. Gomes e Garcia (2002): CV < 10% - baixo; quando 10% < CV < 20% - médio; de 20% < CV < 30% - alto e CV > 30% - muito alto.

Fonte: Autora.

Como o atributo macroporosidade do solo apresentou valores de CV de médio e alto, houve a busca por outros trabalhos, a fim de realizar a validação dos valores obtidos no presente estudo. Corroboram para isso as pesquisas realizadas por Cechim (2007), Szymczak (2013) e Szymczak (2015). Estes autores também encontraram valores de CV alto (20% < CV < 30%), para este atributo físico do solo.

#### 4.1.3 Microporosidade do solo

O atributo de microporosidade do solo obteve diferença significativa nos locais, ainda que na análise no interior dos locais não houve uma diferença significativa. Mesmo assim, pode se observar um leve acréscimo nos valores de microporos nas camadas de 0 a 5 cm (Tabela 5). Pezzoni Filho et al. (2014) verificaram que a camada superficial de 0 a 5 cm é a que sofre maior influência do tráfego de máquinas.

Tabela 5 – Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) em povoamento de *Eucalyptus saligna* com 10 anos de idade

<b>Microporosidade (<math>\text{m}^3.\text{m}^{-3}</math>) - camada 0 a 5 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,273 Aa	0,276 Aa	0,279 Aa	0,277 b	8,14
<b>Local B</b>	0,327 Ab	0,344 Ab	0,350 Ab	0,343 a	
Média	0,304 A	0,310 A	0,315 A		
CV%	8,22				
<b>Microporosidade (<math>\text{m}^3.\text{m}^{-3}</math>) - camada 5 a 10 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,272 Ab	0,275 Aa	0,272 Ab	0,273 b	3,58
<b>Local B</b>	0,305 Ba	0,328 Aa	0,333 Aa	0,325 a	
Média	0,299 A	0,289 A	0,303 A		
CV%	6,63				
<b>Microporosidade (<math>\text{m}^3.\text{m}^{-3}</math>) - camada 10 a 20 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,281 Ab	0,264 Ab	0,258 Ab	0,265 b	5,62
<b>Local B</b>	0,329 Aa	0,310 Aa	0,320 Aa	0,320 a	
Média	0,305 A	0,287 A	0,289 A		
CV%	3,82				
<b>Microporosidade (<math>\text{m}^3.\text{m}^{-3}</math>) - camada 20 a 30 cm</b>					
	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Média</b>	<b>CV%</b>
<b>Local A</b>	0,291 Aa	0,260 Ab	0,276 Ab	0,276 b	7,52
<b>Local B</b>	0,316 Aa	0,315 Aa	0,319 Aa	0,317 a	
Média	0,303 A	0,288 A	0,298 A		
CV%	4,99				

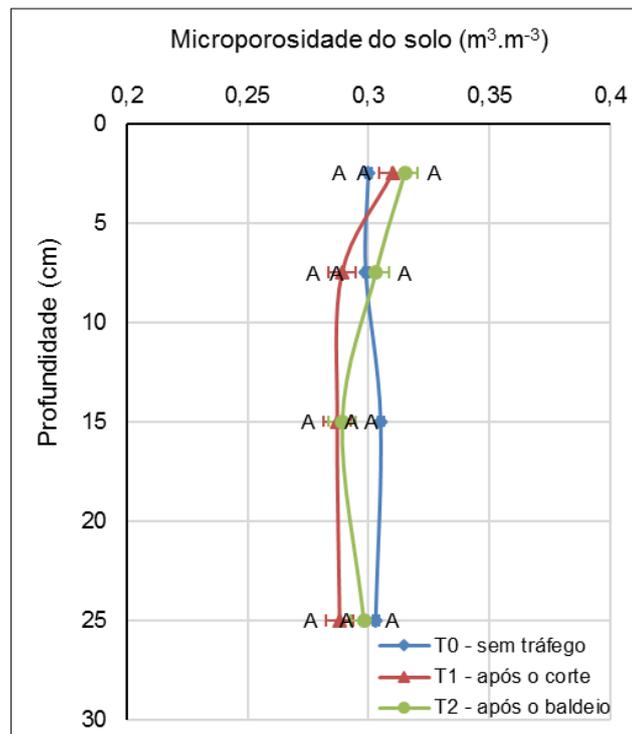
Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05. (T<sub>0</sub> - sem tráfego, T<sub>1</sub> - após o corte, T<sub>2</sub> - após o baldeio); CV - coeficiente de variação.

Fonte: Autora.

Os valores médios em cada camada avaliada não apresentaram comportamento contínuo (Figura 22), ou seja, não houve aumento e/ou redução com

o tráfego de máquinas em todas as camadas. Assim, resultaram em poucas considerações sobre este atributo físico do solo no processo de compactação.

Figura 22 – Representação dos valores médios de microporosidade do solo ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) nos tratamentos avaliados em povoamento de *Eucalyptus saligna*



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Fonte: Autora.

Resultados semelhantes foram encontrados por Martins et al. (2002), em estudo da qualidade estrutural do solo, em quatro povoamentos florestais: *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.*, *Hevea brasiliensis* e mata nativa. Os autores verificaram que os valores de microporosidade não diferiram entre os povoamentos. Em relação à macroporosidade, constataram que apenas na mata nativa não foram observados valores abaixo das condições ideais estabelecidas por Baver et al. (1972) – de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Lopes et al. (2011b) também não encontraram diferença significativa para a porosidade de aeração e porosidade total, após o tráfego de *skidder*, com diferentes tipos de rodados.

Suzuki (2008) evidenciou por meio de seu estudo que a compactação aumenta a densidade e diminui a macroporosidade, conseqüentemente aumentando a

microporosidade do solo, com efeitos até a camada de 40 cm, em área com plantio comercial de eucalipto e até a camada de 10 cm, em área com pastagem. Ainda por esse viés, Nascimento et al. (2019) constataram que nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, principalmente o componente florestal afeta negativamente a qualidade física do solo, nas camadas de 5 cm a 10 cm e 20 a 30 cm.

Contudo, no trabalho realizado por Rosa et al. (2018) foram verificadas alterações significativas no atributo de macro e microporosidade do solo, em Argissolo, sob o cultivo de *Eucalyptus dunnii*. Da mesma forma, Mazurana et al. (2013) ressaltam que os valores de microporos apresentaram diferença antes e após o tráfego, porém apenas na camada até 5 cm para a condição de pousio. Para Holthusen et al. (2018), o manejo inadequado do solo, o aumento da massa das máquinas utilizadas e a intensidade de tráfego ameaçam a funcionalidade de solos.

Mesmo que não ocorra a total transformação de macroporos em microporos no processo de compactação do solo, esses microporos podem sofrer alterações na estrutura e, assim, se tornam pouco eficientes na qualidade física do solo, principalmente no aspecto de retenção de água.

Em relação aos coeficientes de variação (CV), apresentados nos locais e nos tratamentos (Quadro 3), vale observar que ao considerar a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980) e a de Gomes e Garcia (2002), ambos apresentam a mesma classificação, ainda que os limites sejam diferentes. Garcia (1989) afirma que o CV auxilia nas comparações entre as variáveis de naturezas distintas e fornece uma ideia de precisão dos dados, porque representa o desvio padrão expresso em porcentagem da média.

Quadro 3 – Classificação do coeficiente de variação no atributo de microporosidade do solo

	<b>Warrick e Nielsen (1980) e para Gomes e Garcia (2002)</b>			
Camadas de solo	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm	20 a 30 cm
Local	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Tratamento	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Warrick e Nielsen (1980): CV < 12% - baixo; de 12% < CV < 60% - médio; e CV ≥ 60% - alto. Gomes e Garcia (2002): CV < 10% - baixo; quando 10% < CV < 20% - médio; de 20% < CV < 30% - alto e CV > 30% - muito alto.

Fonte: Autora.

## 5 CONCLUSÃO

Em função das deformações nas propriedades físicas do solo, considerando a linha de tráfego de máquinas, por meio da operação de desbaste mecanizado, conseqüentemente ocorreu a compactação do solo. Essa deformação está associada às pressões da massa das máquinas e da carga de madeira sobre o solo.

Ademais, houve um efeito do tráfego de máquinas, sendo que o baldeio da madeira exerceu influência na profundidade impactada, no atributo de densidade do solo, até a camada de 20 cm.

Os macroporos foram altamente afetados com o tráfego de máquinas, principalmente na camada superficial, ao passo que os microporos não foram afetados em nível significativo. Mesmo assim, o tráfego de máquinas é capaz de comprometer a sua funcionalidade, principalmente no aspecto de retenção de água, dificultando o desenvolvimento das plantas.

No vislumbre da importância desta temática de compactação de solos, são recomendadas investigações dos efeitos do tráfego de máquinas no sistema de desbaste com diferente espécies, tipos de solos e criação de cenários, a curto e a longo prazo, a fim de gerar a discussão mais abrangente sobre temática e despertar o interesse das fabricantes de máquinas, para que existam, efetivamente, melhorias do processo.

## REFERÊNCIAS

ALLMAN, M. et al. Soil compaction of various central european forest soils caused by traffic of forestry machines with various chassis. **Forest Systems**, v. 24, n. 3, 2015.

AMARO FILHO, J. et al. Seção I – Física do solo. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira Ciência do solo**, v. 31, p. 415–422. 2007.

ALMEIDA, A. B. **Propriedades físicas de um Latossolo vermelho manejado com material orgânico e submetido à compactação**. 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. 2009. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0532.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: 2003. 6p.

BURGIN, M. R. B. **Desempenho operacional e custos do Harvester no desbaste de *Pinus taeda***. 2016. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)– Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, 2016.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York: John Wiley, 1972. 529 p.

CAMBI, M. et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 406–414, 2017.

CAMBI, M. et al. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 338, p. 124–138, 15 fev., 2015.

CECHIN, F. N. **Compactação de dois Argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L.** 2007. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DAVID H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de *Pinus taeda* L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2014.

DAVID, H. C. et al. Efeito da qualidade do sítio e do desbaste na produção de pinus. **Floram - Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263 p. Tese (Doutorado em Ciência do solo)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, Minas Gerais, v. 29, n. 3, p. 383–390, 2005.

DIAS JUNIOR, M. DE S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 3, p. 248–255, 2005.

DOBNER JÚNIOR, M.; HUSS, J. **Desbaste pelo alto, uma alternativa rentável para povoamentos de *Pinus taeda* no Sul do Brasil**. 28 p. Pomerode, SC: Imprensa Mayer, 2015.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994, p. 3–21. (Special Publication, 35).

DRESCHER, M. S. **Efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)–Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2011. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Dissertacoes/MARTA-DRESCHER.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: EMBRAPA, 3. ed. 2017. 573 p.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. p. 426-447, 2014.

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

GAGGERO, M. R.; TREIN, C. R.; IPPOLITI, G. Influência de sistemas de preparo e pastejo nas características físicas do solo. **Revista do Programa de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 1, n. 1, p. 1–16, 2002.

GARCIA, C. H. Tabelas para classificação do coeficiente de variação. Circular Técnica, IPEF, nº 171, nov. 1989.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**, Piracicaba: FEALQ, 2002. 305 p.

GONTIJO, I. et al. Atributos físicos-hídricos de um latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira Ciência do solo**, v. 32, p. 2227–2234, 2008.

GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soils: A review. **Aust. J. Soil Res.**, v. 18, p. 163–89, 1980.

HIGMAN, S. et al. **Manual do Manejo Florestal Sustentável**. 2. Ed. Viçosa: UFV – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2015. 398 p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771p.

HOLTHUSEN, D. et al. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, v. 177, n. December 2017, p. 113–124, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES – IBÁ. **Resultado Anual. 2017**, Brasília. Disponível em: <[https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 09 out. 2018.

JESUS, G. L. de. et al. Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira Ciência do solo**, v. 39, p 1190–1203, 2015.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 857–867, dez. 2002.

LIMA, J. S. S. et al. Avaliação da compactação do solo em um sistema de colheita de madeira. **Revista Árvore**, v. 24, n. 3, p. 276–282, 2000.

LIMA, J. S. D. S. et al. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 931–938, 2008.

LOPES, S. E. et al. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 369–376, 2006.

LOPES, E. S. et al. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, Edição especial, p. 659–667, 2011a.

LOPES, E. S. et al. Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de *Skidder* com diferentes rodados. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 41, n. 3, p. 471–480, jul.-set. 2011b.

LOPES, E. S. de. et al. Compactação de um solo submetido ao tráfego do *harvester* e do *forwarder* na colheita de madeira. **Floram - Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 223–230, 2015.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3 ed., Viçosa: UFV. 2014. 543 p.

MAGALHÃES, M. C. et al. Residual forest biomass: effects of removal on soil quality. **Revista de Ciências Agrárias**, v. XXXIV, n. 2, p. 205–217, 2011.

- MARTINS, S. G. et al. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, v. 8, n. 1, p. 32–41, 2002.
- MAZURANA, M. et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1185–1195, 2013.
- MENDES, J. C. T.; SEIXAS, F. Avaliação dos impactos da colheita florestal nos atributos físicos do solo em uma reserva legal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 143–155, jun. 2018.
- MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 73 p.
- NASCIMENTO, D. M. do. et al. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292–299, 2019.
- OLIVEIRA JUNIOR, J. C. de.; SOUZA, L. C. de. P.; MELO, V. de. F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da formação guabirota em diferentes unidades de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1491–1502, 2010.
- PEREIRA, N. A. et al. Soil Physical Attributes Under Eucalyptus stands With Non-living and Living Plants. **Journal of Agricultural Science**; v. 11, n. 3; p. 197–207, 2019.
- PEZZONI FILHO, J. C. et al. Compaction of an inceptisol caused by forest extraction with Skidder. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 199–208, 2014.
- PINCELLI, A. L. P. S. M.; SEIXAS, F.; NUNES, R. Compaction and Soil Fertility After Eucalyptus Harvesting Using *Feller Buncher* and *Skidder*. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 191–197, 2014.
- PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Revista Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 161–170, 2011.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdã, v. 102, n. 2, p. 242–254, Mar. 2009.
- 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**: SBCS. Cap. 5, p. 49–134, 2007.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29–48, jul./dez. 2003.

REINERT, D. J. E; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. 2006. 18 p. Disponível em:

<[https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An\\_lise\\_da\\_zona\\_n\\_o\\_saturada\\_do\\_solo\\_\\_texto.pdf](https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__texto.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2018.

RIBEIRO, N. et al. **Manual de silvicultura tropical**. Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal. Maputo, 2002. 130 p.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321–344, jul./set. 2005.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Coordenação e Planejamento. **Atlas Socioeconômico: Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SCP, 2. Ed. Ver. Ampl., 2002. 112p. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/macrozoneamento-ambiental>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

RODRIGUES, C. K. **Compactação do solo causada por dois sistemas de colheita de madeira em florestas de *Eucalyptus grandis***. 2013. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)–Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2013.

RODRIGUES, C. K; LOPES, E. S. Análise espacial da compactação do solo causada pelo sistema de colheita de madeira de árvores inteiras. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 65, n. 3, p. 227–233, 2018.

RODRIGUES, C. K. et al. Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de *harvester* e *forwarder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 387–394, 2015.

RODRIGUES, C. K. et al. Soil Compaction Duo to Wood Harvesting Traffic at Different Extraction Distances. **Floram – Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2, p. 1–8, 2018.

ROSA, S. F. da. et al. Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa gaúcho. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28 n. 2, p. 580–590, abr./jun., 2018.

SANTOS, Sheila. Propriedades físicas do solo. Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2016/08/Propriedades-f%C3%ADsicas-do-solo.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2018.

SAMPIETRO, J. A. **Compactação de cambissolo e neossolos causada pela colheita de madeira com *feller-buncher* e *skidder***. 2010. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2010.

SAMPIETRO, J. A. **Propriedades mecânicas e trafegabilidade de solos em plantios florestais**. 2013. 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S. Compactação de um cambissolo causada por máquina de colheita florestal especializada com geoestatística. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 46, n. 3, p. 307–314, jul./set. 2016.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de *feller buncher* e *skidder* em um Neossolo regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 239–248, jan./mar 2015.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A. **Fixação de carbono: Atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba, PR. 2004 205 p.

SANTOS, M. J. dos. Propriedades físicas dos solos – parte 2. Clima e Água. Disponível em: < <http://professormarciosantos3.blogspot.com/2018/03/propriedades-fisicas-do-solo-parte-2.html>>. Acesso em: 06 jan. 2019.

SCHNEIDER, P. R. **Manejo Florestal**: planejamento da produção florestal. Santa Maria: UFSM, 2002. 492 p.

SCHNEIDER, R.; SCHNEIDER, P. **Introdução ao Manejo Florestal**, 2 ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 566.p. 2008.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: Causas, Efeitos e Práticas de Controle. **Circular técnica nº 163**, IPEF, out. 1988.

SEIXAS, F. Potencial de danos dos sistemas de colheita de madeira no solo e nas cepas. **Série Técnica do IPEF**, n.30, p.63-78, abr. 1997.

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

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

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

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

SILVA, C. A. T.; CEZAR, T. C. M.; NÓBREGA, L. H. P. Porosidade de Latossolos e práticas de manejo agrícola para a conservação do solo. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v. 2, n. 2, p. 153–164, jul. 2011.

SILVA, S. R. et al. 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, n. 2, p. 371–377, 2007.

SIXE, R. M. DE M. B. **Forest**. v. No 07, n. Edição 10-Ano 02, p. 14–26, 2015.

SPERANDIO, H. V.; CECÍLIO, R. A. Atributos físicos do solo em área sob colheita florestal semimecanizada no estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agrícola**, v. 15, n. 2, p. 69–74, 2017.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755–760, 2004.

STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Emater-RS/UFRGS, 2002. 107 p.

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

SZYMCZAK, D. A. **Compactação do solo causada pelos tratores florestais Harvester e Forwarder na colheita de *Pinus taeda* L.** 2013. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SZYMCZAK, D. A. et al. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 641–648, 2014.

SZYMCZAK, D. A. **Influência do manejo de resíduos da colheita de *Pinus taeda* L. na compactação do solo**. 2015. 93 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795–801, out./dez. 2002.

TREVISAN, R. et al. Efeito da intensidade de desbaste na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 39, n. 4, p. 825–831, out./dez., 2009.

VAN LIER, Q. de J. Física do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1ª ed., 298p. 2010.

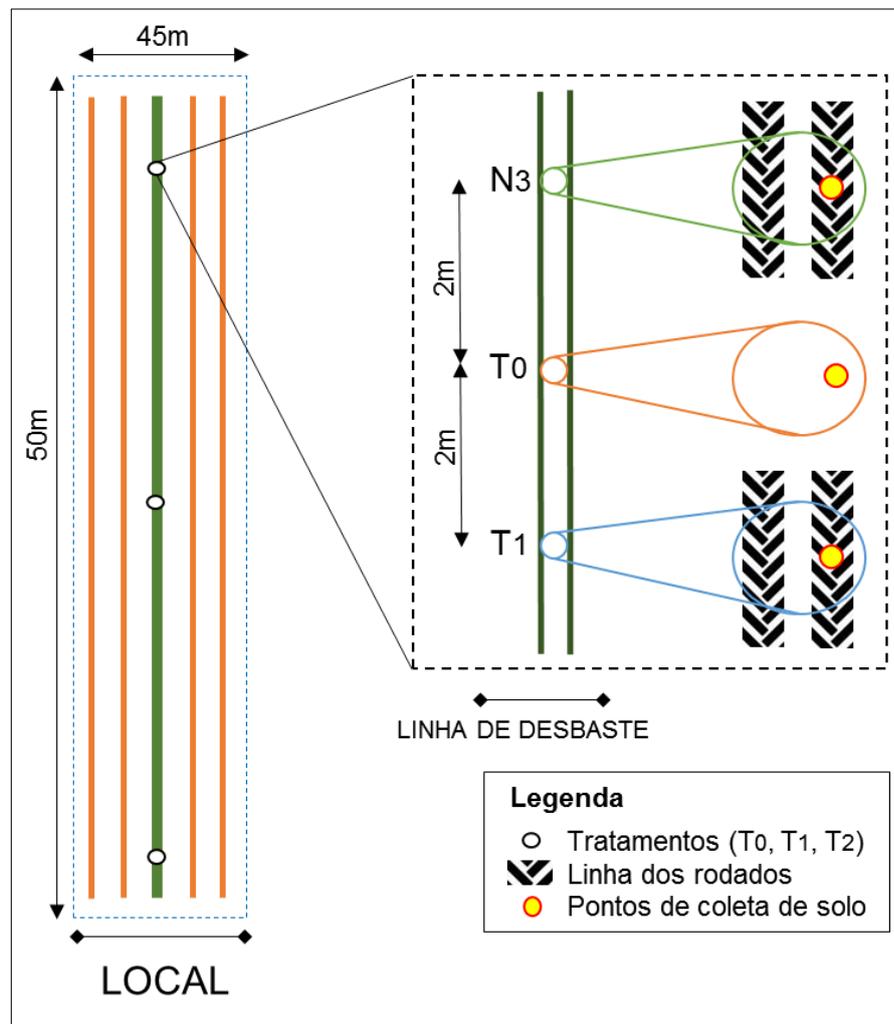
VARGAS, F. et al. Planejando a colheita florestal. **Campo & Negócios** - Florestas, v. VII, p. 35–38, 2018.

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

WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2012, 334p.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE A – ESQUEMA DOS TRATAMENTOS NO LOCAL A E AS COLETAS DE SOLO EM RELAÇÃO AO RODADO DA MÁQUINA



Fonte: Autora.

## APÊNDICE B – PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DO ANÉIS VOLUMÉTRICOS



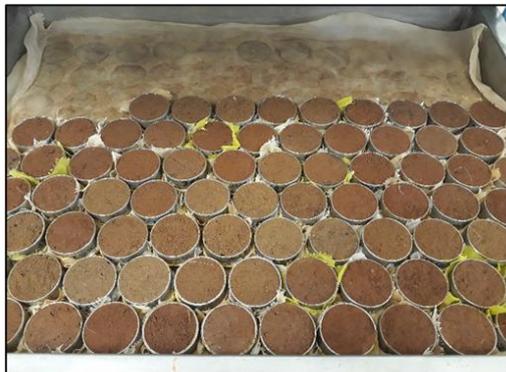
(a) Preparação da amostra



(b) Saturação das amostras



(c) Pesagem amostra saturada



(d) Amostras na mesa de tensão



(e) Retiradas da mesa de tensão, preparadas para estufa.



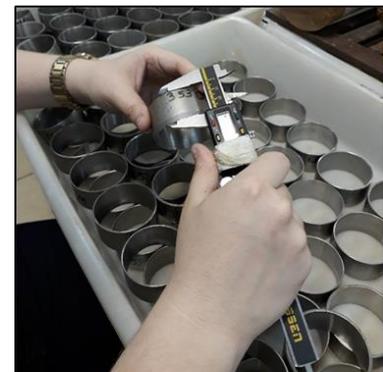
(f) Pesagem amostra seca



(g) Descarte do solo



(h) Limpeza e secagem dos anéis



(i) Diâmetro e altura dos anéis

Onde: (a) preparação da amostra; (b) saturação das amostras; (c) pesagem amostra saturada; (d) amostras na mesa de tensão; (e) retiradas da mesa de tensão, preparadas para estufa; (f) pesagem amostra seca; (g) descarte do solo; (h) limpeza e secagem dos anéis; (i) diâmetro e altura dos anéis.

Fonte: Autora.