



**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA  
FLORESTAL NA ESTRUTURA DE  
DIFERENTES CLASSES DE SOLO**

**LAVRAS - MG**

**2015**

**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA  
ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Moacir de Souza Dias Junior

**LAVRAS - MG**

**2015**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da  
Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor.**

Souza, Zélio Resende de.

Impactos das operações de colheita florestal na estrutura de  
diferentes classes de solo / Zélio Resende de Souza. – Lavras :  
UFLA, 2015.

120 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)—Universidade Federal de  
Lavras, 2015.

Orientador(a): Moacir de Souza Dias Junior.

Bibliografia.

1. Compactação do Solo. 2. Manejo Florestal. 3. Colheita de  
Eucalipto. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL  
NA ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

APRESENTADA em 20 de fevereiro de 2015

Dr. Ivoney Gontijo - UFES

Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira - UFLA

Ph.D Moacir de Souza Dias Junior - UFLA

---

**Ph.D Moacir de Souza Dias Junior**

**Orientador**

**LAVRAS - MG**

**2015**

Ao meu pai Domingos (*in memória*) com toda sua simplicidade e humildade, me ensinou princípios que valem para toda vida. À minha irmã Nelma (*in memória*) que sempre torceu pelo meu sucesso e superação das dificuldades. À minha mãe Luci que sempre fez o possível para que ficássemos amparados, lutando para alcançar dias mais gloriosos. Ao professor, orientador e na maioria das vezes comportou-se como Pai, chamando atenção e fazendo-me com que mantivesse a postura correta para superar os obstáculos e vencer os desafios.

## **DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Ciência do Solo (DCS) e ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos e atividades laboratoriais.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde, por guiar meus passos e iluminar minha caminhada nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais pela construção, educação, humildade e valorização da vida.

Ao Senhor Waldemar e Dona Rita, juntamente com sua família que abriram as portas da sua casa, me abraçando, apoiando e auxiliando nos momentos adversos, pela amizade, carisma e atenção.

Ao Gilson e a Cristina e seus familiares pelo acolhimento, atenção e liberdade em sua residência.

Ao professor Doutor Moacir pela oportunidade, confiança, orientação, ensinamentos, amizade, conselhos e apoio ao longo da caminhada acadêmica.

A todas as pessoas que auxiliaram nos trabalhos, diretamente ou indiretamente no decorrer do curso, em especial Dulce, Doroteo, Paulinha, Paula Caruana, Maria Luiza, Diego Tassinari, Samara, Bruno Monotoani, Érika, Bárbara, entre outros.

As demais pessoas do Departamento de Ciência do Solo pelo carinho, amizade, confiança e principalmente pelo apoio durante as dificuldades, com conselhos, incentivo, palavras de conforto e palavras amigas nos momentos de transtornos e desesperos.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo pelo apoio, confiança, oportunidade e ensinamentos.

Aos demais professores e funcionários que fizeram parte dos ensinamentos, companheirismo e simplicidade.

Aos amigos que participaram da minha caminhada incentivando e apoiando para vencer as barreiras, como Éder, Ulisses, Leandro, Wálbert, Paula Caruana, Samara, Érika, Bruno Montoani, Serginho, entre outros.

A TODOS vocês, levo registrado a importância de cada um em minha vida.

**Muito Obrigado!**

## RESUMO

O setor florestal brasileiro apresenta grande importância para a economia do país, sendo necessário manejá-lo de forma sustentável a fim de atender a crescente demanda de matéria prima pela população. Dentre os fatores do setor madeireiro, o solo é o principal desafio tendo em vista que é necessário preservar e manter seu potencial produtivo com qualidade e produtividade. Desta forma, objetivou-se no presente trabalho elaborar os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC), que relacionam o decréscimo da pressão de pré-consolidação do solo em função do aumento da umidade, para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) do município de Elias Fausto-SP, e para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e o Neossolo Quartzarênico (RQ) do município de Botucatu-SP. A partir da elaboração dos MCSC, avaliou-se os impactos das operações de colheita florestal proporcionados pelos equipamentos Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nas camadas superficial e subsuperficial das respectivas classes de solo, sendo a camada subsuperficial a camada de maior resistência à penetração diagnosticada em campo. As amostras de solo foram coletadas com preservação da estrutura usando anéis volumétricos, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. As operações realizadas com os equipamentos estudados vêm promovendo compactação do solo, havendo necessidade de alterar a forma de execução destas atividades. Na camada de 0 a 3 cm, o PVA foi o que mais sofreu compactação e a Garra Traçadora foi o equipamento mais impactante. Na camada subsuperficial o LVAd e o PVAd sofreram a maior compactação e o Feller Büncher foi o mais impactante.

Palavras-chave: Compactação do solo. Manejo florestal. Colheita de Eucalipto.



## ABSTRACT

The Brazilian forestry sector presents a great relevance to the economy of the country, thus being necessary to manage it in a sustainable way in order to respond to the population's growing demand on raw materials. Among the production phases, the soil is the main challenge, as it is necessary to maintain its productive potential, with both quality and productivity. The present study aimed to generate the load bearing capacity models (LBCM), which relate the decrease on precompression stress with increase on soil moisture, for a Red-Yellow Latossolo (LVAd) and a Red-Yellow Argissolo (PVAd) from Elias Fausto-SP, and a Red-Yellow Argissolo (PVA), a Red-Yellow Latossolo (LVAd), a Red-Yellow Latossolo (LVA), a dystrophic Red Latossolo (LVd) and a Neossolo Quartzarênico (RQ) from Botucatu-SP. From the LBCM, it was evaluated the impact of forestry harvesting operations conducted with Feller Büncher, Skidder and Grapple Saw on the soil surface and subsurface of the studied soil classes, being the subsurficial layer the one of highest penetration resistance observed in the field. The soil samples were collected preserving its structure through ANÉIS VOLUMÉTRICOS, which were submitted to ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL. The management with this machinery is causing soil compaction, thus demanding changes on the way these operations are performed. On the 0-3 cm layer the PVA suffered the greatest compaction, while the Grapple Saw was the most impacting equipment. On the depth layer, LVAd and PVAd presented the highest compaction and Feller Büncher was the most impacting equipment.

Keywords: Soil compaction. Forest management. Eucalyptus harvest.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Primeira Parte

Figura 1	Reta de compressão virgem do solo (A) para solos que não sofreram nenhuma compactação prévia e curva de compressão do solo (B) quando o solo sofreu compactação prévia.....	31
----------	---	----

### Artigo 1

Figura A1-1	Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do PVA, do LVAd e do PVAd.....	47
Figura A1-2	Modelos de capacidade de suporte de carga para um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) situado no município de Botucatu-SP, para as duas camadas.....	52
Figura A1-3	Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), situado no município de Elias Fausto-SP, na camada superficial e subsuperficial.....	54
Figura A1-4	Modelos de capacidade de suporte de carga para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), situado no município de Elias Fausto - SP, para as duas camadas avaliadas.....	55

Figura A1-5	Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) na camada superficial.....	57
Figura A1-6	Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) na camada subsuperficial.....	59
Figura A1-7	Porcentagem de amostras compactadas realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora para o PVA, LVAd e PVAd na camada superficial e subsuperficial.....	62
 <b>Artigo 2</b>		
Figura A2-1	Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do LVA, LVd e RQ.....	76
Figura A2-2	Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), situado no município de Botucatu-SP, para a camada superficial e subsuperficial.....	81

Figura A2-3	Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd), do município de Botucatu - SP, para a camada superficial e subsuperficial.....	82
Figura A2-4	Modelos de capacidade de suporte de carga para o Neossolo Quartzarênico (RQ), do município de Botucatu - SP, para a camada superficial e subsuperficial.....	83
Figura A2-5	Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada superficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Neossolo Quartzarênico (RQ).....	85
Figura A2-6	Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada subsuperficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Neossolo Quartzarênico (RQ).....	87
Figura A2-7	Percentual de amostras compactadas nas operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ) na camada superficial e subsuperficial.....	89

### Artigo 3

Figura A3-1	Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do LVA, LVd e RQ.....	105
Figura A3-2	Aumento da densidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) na camada superficial sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora.....	106
Figura A3-3	Redução da porosidade nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) na camada superficial sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora.....	107
Figura A3-4	Aumento da densidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) nas camadas subsuperficiais sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora.....	108
Figura A3-5	Redução da porosidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) nas camadas subsuperficiais sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora.....	109

Figura A3-6	Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada superficial dos solos argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e para os solos arenosos (LVA, LVd e RQ).....	111
Figura A3-7	Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada subsuperficial dos solos argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e dos solos arenosos (LVA, LVd e RQ).....	113

## LISTA DE TABELAS

### Artigo 1

Tabela A1-1	Densidade de partículas (Dp) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).....	43
Tabela A1-2	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA).....	48
Tabela A1-3	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd).....	49
Tabela A1-4	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).....	51
Tabela A1-5	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).....	51

Tabela A1-6	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).....	53
Tabela A1-7	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).....	54
Tabela A1-8	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).....	56
Tabela A1-9	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada subsuperficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).....	58



Tabela A1-10	Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal nas camadas avaliadas das respectivas classes de solo.....	60
--------------	---	----

## **Artigo 2**

Tabela A2-1	Densidade de partículas (Dp) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), e do Neossolo Quartzarênico (RQ).....	75
Tabela A2-2	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).....	77
Tabela A2-3	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho distrófico (LVd).....	78
Tabela A2-4	Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Neossolo Quartzarênico (RQ).....	80
Tabela A2-5	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989) para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).....	81

Tabela A2-6	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd).....	82
Tabela A2-7	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989) para o Neossolo Quartzarênico (RQ).....	83
Tabela A2-8	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ).....	84
Tabela A2-9	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada subsuperficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ).....	86
Tabela A2-10	Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal nas camadas avaliadas das respectivas classes de solo.....	88

### Artigo 3

Tabela A3-1	Densidade de partículas (Dp) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ).....	104
Tabela A3-2	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial e subsuperficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ).....	110
Tabela A3-3	Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal das classes de solo nas camadas avaliadas.....	114
Tabela A3-4	Porcentagem de amostras compactadas nos solos argilosos (PVA, LVAd e no PVAd) e nos solos arenosos (LVA, LVd e RQ) com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nas duas camadas.....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
DCS	Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras.
Dp	Densidade de partículas
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
LV	Latossolo Vermelho
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo
LVAd	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico
LVd	Latossolo Vermelho distrófico
MCSC	Modelos de Capacidade de Suporte de Carga
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico
RQ	Neossolo Quartzarênico

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE: Revisão de literatura.....</b>	<b>23</b>
	<b>USO DOS MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL NA COMPACTAÇÃO DO SOLO.....</b>	<b>23</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>O setor florestal.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2</b>	<b>A compactação do solo.....</b>	<b>26</b>
<b>1.3</b>	<b>Conceito de compactação.....</b>	<b>27</b>
<b>1.4</b>	<b>Causas da compactação.....</b>	<b>28</b>
<b>1.5</b>	<b>Consequências da compactação.....</b>	<b>29</b>
<b>1.6</b>	<b>Avaliação da compactação.....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>
	<b>SEGUNDA PARTE: Artigos.....</b>	<b>39</b>
	<b>ARTIGO 1 - Solos argilosos.....</b>	<b>39</b>
	<b>IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA ESTRUTURA DE SOLOS ARGILOSOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO.....</b>	<b>39</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARGILOSOS.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>

	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	63
	<b>ARTIGO 2 - Solos arenosos.....</b>	68
	<b>IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA ESTRUTURA DE SOLOS ARENOSOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO.....</b>	68
1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	69
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	70
2.1	<b>Feller Büncher.....</b>	71
2.2	<b>Skidder.....</b>	72
2.3	<b>Garra Traçadora.....</b>	72
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	76
4	<b>AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARENOSOS.....</b>	87
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	91
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	91
	<b>ARTIGO 3 - Comparação entre os solos argilosos e arenosos.....</b>	95
	<b>IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA ESTRUTURA DE SOLOS ARGILOSOS E ARENOSOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO.....</b>	95
1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	96
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	99
2.1	<b>Feller Büncher.....</b>	100
2.2	<b>Skidder.....</b>	101

<b>2.3</b>	<b>Garra Traçadora.....</b>	<b>101</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARGILOSOS E ARENOSOS.....</b>	<b>114</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>116</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>117</b>

## **PRIMEIRA PARTE: Revisão de literatura**

### **USO DOS MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL NA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

#### **1 INTRODUÇÃO GERAL**

O uso intensivo da mecanização agrícola tem alterado as propriedades físicas do solo (DIAS JUNIOR, 2000; DIAS JUNIOR et al., 2003; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) devido à utilização de máquinas de grande porte (NOVAIS; SMYTH, 1999), causando degradação de sua estrutura devido à compactação (RIBEIRO, 1999) e prejudicando o potencial produtivo dos solos (GUIMARÃES, 2000).

A manutenção das condições físicas do solo é dependente do processo de compactação, o qual depende de fatores internos e externos (DIAS JUNIOR, 2000; HORN, 1989; LEBERT; HORN, 1991; RAGHAVAN; ALVO; MCKYES, 1990). Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga aplicada, enquanto que os fatores internos são influenciados pela história de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial do solo, mineralogia e teor de carbono (AJAYI, 2009; DIAS JUNIOR, 1994; ETANA; COMIA; HAKANSSON, 1997; GUPTA; HADAS; SCHAFER, 1989; LEBERT; HORN, 1991).

Neste sentido, visando uma agricultura mais sustentável, a caracterização física do solo torna-se uma ferramenta importante no entendimento e na modelagem do comportamento compressivo do solo.

Uma das limitações para que o desenvolvimento florestal sustentável seja atingido, está relacionado com as operações de colheita que podem causar



compactação do solo, sobretudo, na ausência de controle da umidade do solo ou de sua capacidade de suporte de carga no momento de realização destas operações (DIAS JUNIOR et al., 2003). Assim, o tráfego indiscriminado nas áreas florestais tem sido preocupante, justamente pela possibilidade de disseminação da compactação causada pelo tráfego de máquinas ao longo dos anos, podendo causar, em consequência, uma redução na produtividade. Portanto, na área florestal, o uso sustentável do solo está relacionado com a questão do tráfego de veículos durante as operações de colheita (DIAS JUNIOR et al., 2003).

### **1.1 O setor florestal**

Atualmente o setor florestal apresenta grande importância para a economia e atividades socioambientais do país. Este é um segmento que abastece vários setores com matéria prima e produtos básicos para processamento de outros derivados de madeira. Para consolidar a representatividade e importância do setor florestal no Brasil, em 2012, este movimentou 56,3 bilhões de reais, em uma área de 6,6 milhões de hectares com pinus e eucalipto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF, 2013) e também com exportação de produtos para os Estados Unidos, Argentina, China e países da Europa.

Esses números apesar de serem representativos na importância do setor florestal, apresentaram menor participação ativa na economia do país, com menor crescimento do setor em comparação com os anos anteriores. Segundo dados da ABRAF (2013), o menor crescimento está associado ao aumento dos custos de produção da madeira, diminuindo a rentabilidade das empresas e reduzindo a competitividade no mercado, traduzindo em um menor investimento para o setor, em comparação com os anos anteriores. Mesmo com a crise

enfrentada pelo setor, o Brasil contribui anualmente com 17% de toda a madeira colhida e com 14% do carvão vegetal, sendo o quarto maior produtor de celulose e o nono maior produtor de papel (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2014). A região sudeste concentra a maior parcela da produção de eucalipto, com 54,3% da produção (ABRAF, 2013), sobretudo os estados de São Paulo e Minas Gerais.

As demandas por matéria prima nos diversos setores fizeram com que várias empresas despertassem interesse para produção de matéria prima de qualidade com intuito de atender à grande demanda, tanto do mercado interno, como do externo. Assim, surgiram inúmeras empresas visando os diversos segmentos de produção como móveis, papel, celulose, carvão vegetal entre outras. A cada dia, o setor vem crescendo e ganhando mais espaço na economia brasileira, sendo hoje um setor de grande importância e indispensável para muitas indústrias que possuem a madeira como produto básico no seu segmento. Entre as várias empresas existentes podemos destacar a EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA que atua em diversos segmentos.

Essa empresa foi fundada em 1951 com a primeira sede instalada em São Paulo. Em meados de 1965, novas fábricas se expandiram por todo território nacional possibilitando sua ascensão ao mercado externo. Com a ampliação de novas fábricas na década de 80, no interior de São Paulo, a empresa atingiu também, além do segmento florestal, o setor madeireiro e mineral (EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA, 2014).

Atualmente, as empresas do setor florestal produtoras de matéria prima estão voltadas para o manejo sustentável do meio ambiente, necessitando de um selo de certificação para a comercialização oficial de seus produtos. Nessa perspectiva, as exigências dos órgãos certificadores obrigam as empresas a seguirem normas estabelecidas seguindo uma legislação ambiental mais rigorosa, visando à preservação ambiental que inclui a responsabilidade social e

menor impacto no sistema como um todo, juntamente com os acordos estabelecidos em contratos entre produtores e consumidores (ABRAF, 2013).

Diante da grande demanda por matéria prima, é essencial o manejo racional das florestas a fim de permitir a longevidade dos recursos renováveis e garantir a produtividade para as gerações futuras. Baseada nesta premissa deve-se considerar as peculiaridades do solo a ser explorado que é o suporte para a produção da matéria prima requerido não somente pela empresa, mas também pela sociedade em geral.

Para manejar o solo de maneira menos impactante é preciso estudar suas características intrínsecas, isto é, entender como se comportam diante das condições ambientais e climáticas e sua funcionalidade, a fim de inferir sobre sua suscetibilidade à degradação e capacidade de se manter produtivo. Entre os vários fatores com potencial de agredir a estrutura solo, a carga aplicada pelas máquinas florestais é preocupante devido ao porte mais elevado e com maior capacidade de rendimento operacional. Desta forma, é preciso estudar a capacidade de carga que uma determinada classe de solo a ser explorada suporta, para então evitar a compactação do mesmo e permitir sua sustentabilidade estrutural para as produções futuras.

## **1.2 A compactação do solo**

A compactação do solo é um processo que altera a estrutura do solo (MIRANDA, 2001) e conseqüentemente a sua qualidade física (FERREIRA; DIAS JUNIOR, 1996). A agregação e o arrançamento das partículas do solo e do espaço poroso entre elas dá-se o nome de estrutura do solo (MARSHALL, 1962) a qual pode ser alterada com manejo do mesmo. Quando este manejo ocorre de maneira inadequada pode haver degradação do solo com alterações irreparáveis em sua estrutura.

Entre os vários processos de degradação da estrutura do solo, a compactação é o principal deles, sendo um dos mais preocupantes e de ocorrência em grandes proporções nos solos com alguma forma de exploração, podendo acarretar enormes prejuízos, como por exemplo a redução da capacidade produtiva. Segundo Dias Junior et al. (2007), a compactação é a principal forma de degradação da estrutura do solo. Essa deformação física do solo depende da pressão aplicada e da intensidade de tráfego de máquinas sobre o solo.

### **1.3 Conceito de compactação**

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da sua densidade em consequência da redução do seu volume, resultante da expulsão do ar dos poros do solo (ABID; LAL, 2008; DIAS JUNIOR, 2000; GLAB e KULING, 2008; GUPTA; ALAMARAS, 1987; GUPTA; HADAS; SCHAEFER, 1989). Muitas vezes é chamado incorretamente de adensamento do solo, que consiste no fenômeno de redução do volume com a expulsão de água dos poros do solo ou ainda decorrente de processos pedogenéticos (DIAS JUNIOR, 2000). A compactação é um processo físico que promove a alteração da estrutura e os atributos físico-hídricos do solo (DEDECEK; GAVA, 2005).

Entende-se também que a compactação é o resultado de um estresse mecânico sofrido pelo solo, reduzindo seu volume e aumentando a densidade devido à expulsão do ar dos poros (MAGALHÃES; FAULIN; MOLIN, 2004). Na Engenharia Civil, a compactação do solo é definida como sendo o rearranjo das partículas do solo pela aplicação de uma energia mecânica (HOLTZ; KOVACS, 1981). Já para as ciências agrárias, a compactação é um resultado indesejável da mecanização agrícola (HILLEL, 1998).

A compactação também pode ser definida como sendo uma diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, acarretando em um arranjo mais denso das partículas do solo e conseqüente redução da porosidade, resultado de uma ação antrópica, enquanto o adensamento é um fenômeno natural com redução do espaço poroso com conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo, por dessecação, iluviação ou precipitação química (CURI et al., 1993).

#### **1.4 Causas da compactação**

O manejo inadequado do solo pode provocar um aumento da densidade do solo, resultando em maior resistência mecânica (AJAYI et al., 2010) e promovendo um aumento na capacidade suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR et al., 2007; SILVA, DIAS JUNIOR, LEITE, 2007).

O processo de compactação está associado ao manejo incompatível às características e propriedades do solo, principalmente à alta carga aplicada pelas máquinas e a intensidade de aplicação das mesmas na área produtiva. Com isso, uma das restrições para o desenvolvimento sustentável na área florestal, está relacionada ao tráfego de máquinas durante as operações de colheita, que podem causar a compactação do solo (DIAS JUNIOR et al., 2005).

A mecanização nas áreas florestais constitui o principal fator responsável pela compactação dos solos (DIAS JUNIOR et al., 2007) como nas demais áreas agrícolas, pelo revolvimento na preparação do solo para o plantio e pelo tráfego, interferindo nas relações entre ar, água e temperatura responsáveis pela germinação, brotação e emergência de plantas e conseqüentemente crescimento e desenvolvimento vegetal (SILVA; KAY; PERFECT et al., 1994).

No manejo florestal, as operações de colheita e baldeio da madeira são as atividades que aplicam maior pressão na estrutura do solo,

proporcionando principalmente nos períodos chuvosos, maior risco de compactação do solo. O número e a frequência de passadas em uma área influenciam na estrutura do solo (AMPOORTER et al., 2007; ARVIDSSON, 2001; SILVA et al., 2003) podendo resultar em compactação do solo (MARSILI et al., 1998). Portanto, é necessário maior atenção nas operações florestais no período chuvoso, quando o solo está mais úmido e mais susceptível aos impactos operacionais, facilitando a degradação da sua estrutura.

### **1.5 Consequências da compactação**

Dentre as consequências da compactação do solo temos o comprometimento do desenvolvimento do sistema radicular das culturas devido à menor aeração do solo e da sua sustentabilidade ao longo dos anos de cultivo devido à suscetibilidade à erosão do solo pela baixa infiltração e menor disponibilidade de água para as plantas (OLIVEIRA; SEVERIANO; MELLO, 2007). A compactação do solo também afeta a disponibilidade de nutrientes para as plantas, através de mecanismos indiretos, como o aumento da impedância à difusão de P (COSTA et al., 2006) e o aumento das perdas de N por desnitrificação devido à redução da aeração do solo (ROCHA et al., 2008). O manejo com o maquinário agrícola durante as etapas de produção da cultura, em condições de umidade inadequada ao tráfego de máquinas, tem sido o principal responsável pela degradação da estrutura do solo, reduzindo seu potencial produtivo (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2011; DIAS JUNIOR, 2000; SEVERIANO et al., 2011). Quando essas operações são realizadas em condição de maior conteúdo de água no solo, aumenta a probabilidade de dano à sua estrutura

(DIAS JUNIOR et al., 2007) devido à maior susceptibilidade em função da umidade.

No solo, a compactação ocasiona aumento da sua densidade e da resistência mecânica, diminuição na porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (DIAS JUNIOR, 2000; SERVADIO et al., 2001). Os solos com maior grau de compactação apresentam maior resistência ao cisalhamento (AZEVEDO, 1999) e à penetração (MARASCA et al., 2011) e aumento na capacidade suporte de carga (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008; DIAS JUNIOR, 1994; 2000; DIAS JUNIOR et al., 2007; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; KONDO, 1998; MIRANDA et al., 2003; SILVA; BARROS; COSTA, 2006) devido ao melhor arranjo entre as partículas do solo, resultando em um menor espaço poroso e maior densidade do solo (IORI; DIAS JUNIOR; SILVA, 2012). Como consequência a absorção de água e nutrientes pelas plantas é significativamente alterada e então as trocas gasosas são dificultadas (ARVIDSSON, 2001; DÜRR; AUBERTOT, 2000; GYSI, 2001; ISHAQ et al., 2001; LIPIEC et al., 2006). Isso contribui para redução da capacidade produtiva do solo, aumento da erosão e da energia necessária para o preparo do solo (CANILLAS; SALOKHE, 2002).

## **1.6 Avaliação da compactação**

Para avaliar a compactação do solo é possível usar suas propriedades físicas como a densidade do solo, resistência à penetração, porosidade e condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). A partir de 1994, a compactação do solo passou a ser avaliada também pela pressão de pré-consolidação (DIAS JUNIOR, 1994; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999) que é um indicador da sustentabilidade de sua estrutura e uma medida de capacidade

suporte de carga dos solos (DIAS JUNIOR et al., 2007; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

A pressão de pré-consolidação divide a curva de compressão do solo em duas regiões: a) uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis; b) uma região de deformações plásticas e não recuperáveis (SILVA et al, 2010).

Os Modelos de capacidade de Suporte de Carga (MCSC) expressam a pressão de pré-consolidação em função da umidade do solo (DIAS JUNIOR, 1994). Quando o solo não sofreu nenhuma aplicação de pressão, essa relação é linear (Figura 1A), e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não recuperáveis, causando, portanto, compactação adicional do solo (Figura 1B).

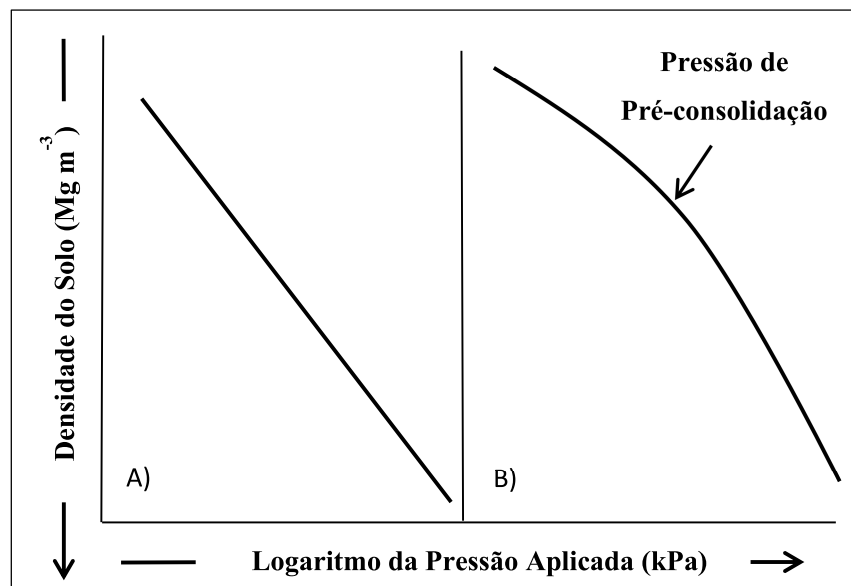


Figura 1 Retas de compressão virgem do solo (A) para solos que não sofreram nenhuma compactação prévia e curva de compressão do solo (B) quando o solo sofreu compactação prévia

Fonte: Dias Junior (1996)



## REFERÊNCIAS

ABID, M.; LAL, R. Tillage and drainage impact on soil quality I: aggregate stability, carbon and nitrogen pools. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 100, n. 1-2, p. 89-98, Aug. 2008.

AJAYI, A. E. et al. Assessment of vulnerability of Oxisols to compaction in the Cerrado region of Brazil. **Pedosphere**, Nanjing, v. 20, n. 2, p. 252-260, 2010.

\_\_\_\_\_. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan. 2009.

AMPOORTER, E. et al. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 241, n. 1-3, p. 162-174, Mar. 2007.

ARAÚJO JUNIOR, C. F. et al. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 115-131, 2011.

\_\_\_\_\_. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejos de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 67-78, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico ABRAF 2013, ano base 2012**. Brasília, DF: ABRAF, 2013.

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solo de Viçosa, MG.** 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 828-835, out./dez. 2006.

CURI, N. et al. **Vocabulário da ciência do solo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993.

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

DIAS JUNIOR, M. S. A soil mechanics approach study soil compaction In: ACHYUTHAN, H. **Soil and soil physics in continental environment.** Chenna: Allied Publishers Private, 2003. p. 179-199.

\_\_\_\_\_. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: UFV, 2000. p. 55-94.

\_\_\_\_\_. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.** 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - East Lansing State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, 2003.

\_\_\_\_\_. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

\_\_\_\_\_. Traffic effects on the preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientiae Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, May/June 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, jun. 1996.

DÜRR, C.; AUBERTOT, J. N. Emergence of seedling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by size, roughness and position of aggregates in the seedbed. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 219, n. 1-2, p. 211-220, Mar. 2000.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSSON, I. Effect of uniaxial stresses on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 13-21, Dec. 1997.

EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA. **Site da Eucatex**. Disponível em: <<http://ri.eucatex.com.br/Default.aspx>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

FERREIRA, M. M; DIAS JUNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1996.

GLAB, T.; KULIG, B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 169-178, June 2008.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio convencional**. 2000. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p. 65-100, Jan. 1987.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E. et al. (eds). **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 133-142, Sept. 2001.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

HORN, R. Strength of structured soils to loading – a review of process on macro and microscale; European aspects. In: LARSON, W. E. et al. (eds). **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 9-22.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório BRACELPA**. São Paulo: IBÁ, 2014.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, supl. 1, p. 185-195, mar. 2012.

ISHAQ, M. et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 3-4, p. 153-161, July 2001.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 497-506, jul./set. 1999.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 274-286, Feb. 1991.

LIPIEC, J. et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 210-220, Sept. 2006.

MAGALHÃES, R. P.; MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Estudo da espacialidade do índice de cone em função do local amostrado em uma lavoura de café (*Coffea Arabica* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. p. 1-7.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, 2011.

MARSHALL, T. J. The nature, development, and significance of soil structure. In: NEALE, G. J. (ed.). **Transaction of joint meeting of commissions IV e V (INSS)**. Palmerston North: [s.n.], 1962. p. 243-357.

MARSILI, A. et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber – and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Nanjing, v. 49, n. 3, p. 185-199, 1998.

MIRANDA, E. E. V. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região de cerrados**. 2001. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

MIRANDA, E. E. V. et al. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, n. esp., p. 1506-1515, dez. 2003.

NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. **Fósforo em solo e plantas em condições tropicais**. Viçosa: UFV/DPS, 1999.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia-GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 265-270, 2007.

RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: a view toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v. 11, p. 1-36, 1990.

RIBEIRO, M. A. V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade**. 1999. 71 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

ROCHA, F. A. et al. Modelo numérico do transporte de nitrogênio no solo. Parte II: Reações biológicas durante a lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 54-61, jan./fev. 2008.

SERVADIO, P. et al. Effect on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 143-155, 2001.

SEVERIANO, E. C. et al. Structural changes in Latosols representative of the Cerrado Region: I - Relationships between soil physical attributes and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, May/June 773-782, 2011.

SILVA, A. P. et al. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. J. (ed). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 241-281.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov. 1994.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de pré-consolidação de dois Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 89-93, jan. 2007.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 973- 983, nov./dez. 2003.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 842-847, out./dez. 2006.

**SEGUNDA PARTE: Artigos****ARTIGO 1 - Solos argilosos****IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA  
ESTRUTURA DE SOLOS ARGILOSOS CULTIVADOS COM  
EUCALIPTO<sup>1</sup>****Zélio Resende de Souza<sup>2</sup>, Moacir de Souza Dias Junior<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Parte da dissertação do primeiro autor<sup>2</sup> Mestrando do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras<sup>3</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras**RESUMO**

O setor florestal é um dos grandes responsáveis pela produção de matéria prima e derivados fundamentais para os diversos segmentos que contribuem para a economia do país. Esse setor deve ser operado da melhor maneira possível, a fim de garantir sua continuidade produtiva e preservação do meio ambiente para as gerações futuras. Dentre os processos produtivos do setor, a colheita florestal e o baldeio da madeira são as principais atividades que podem causar compactação do solo, danificando sua estrutura e acarretando conseqüentemente outros problemas. Diante disso, objetivou-se com esse trabalho elaborar os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para diferentes solos argilosos cultivados com eucalipto sendo um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e avaliar o impacto das operações de colheita florestal realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nas respectivas classes de solo na camada superficial e subsuperficial, sendo esta a camada de maior resistência à penetração diagnosticada em campo. Foram coletadas amostras com preservação da estrutura usando os anéis volumétricos na camada superficial e subsuperficial as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. Para a elaboração dos MCSC foram coletadas 15 amostras em cada camada e em cada classe de solo, resultando em 90 amostras. Para a avaliação dos impactos das operações de colheita florestal foram coletadas 10 amostras em cada classe de solo e em cada camada para cada equipamento a ser avaliado. Os MCSC diferiram estatisticamente demonstrando que as classes de solos possuem comportamento diferente quanto à sua capacidade de suporte de carga. Todas as classes de solo após



as operações de colheita florestal apresentaram-se compactadas ou com tendência à compactação, sendo o PVA o mais compactado e a Garra Traçadora o equipamento que promoveu maior compactação.

Palavras-chave: Compactação do solo. Pressão de pré-consolidação. Manejo do solo.

### ABSTRACT

The forestry sector is a major player in Brazilian economy, generating raw materials and processed goods that are essential to several other industries. This sector must be conducted considering the best management practices, ensuring its business continuity and environmental conservation for future generations. Regarding the production process, forest harvest and logging operations are the main causes of soil compaction, damaging soil structure and resulting in several negative consequences. To prevent this from occurring, it is important to assess the soil load bearing capacity as a function of water content, thus managing it in such a way as not to induce soil structural degradation. Aiming soil productive continuity, the load bearing capacity models (LBCM) were generated for different soils under eucalypt forest, which included (according to Brazilian Soil Classification System) a Red-Yellow Argissolo from Botucatu-SP, and a Red-Yellow Latossolo (LVAd) and a Red-Yellow Argissolo (PVAd) from Elias Fausto-SP, all of them classified as clayey or very clayey soils. The generated LBCM were used to assess the impact on soil structure due to harvest and logging operations with Feller Buncher, Skidder and Grapple Saw. Analysis were conducted with undisturbed soil samples collected at two soil depths, 0-3 cm, the surface layer, and 30-33 cm (PVA and LVAd) or 27-30 cm (PVAd), the upper B horizon layer. The LBCM for each soil were considered statistically different, indicating that the soils present heterogeneous behavior regarding their load bearing capacity. All the samples evaluated after mechanized operations were compacted or with a tendency to become compacted.

Keywords: Soil compaction. Precompression stress. Soil management.

## 1 INTRODUÇÃO

A compactação tem sido identificada como um dos principais problemas causadores da degradação dos solos (CANILLAS; SALOKHE, 2002; DIAS JUNIOR, 2003; DIAS JUNIOR et al., 2003). Os diferentes usos de máquinas e equipamentos para a prática agrícola têm alterado as

propriedades físicas e mecânicas dos solos (DIAS JUNIOR, 2000; DIAS JUNIOR; MIRANDA, 2000; HORN; VAN DEN AKKER; ARVIDSSON, 2000), causando compactação e restringindo a penetração de raízes (GYSI, 2001).

Nesse sentido, temos a compactação como um processo de degradação do solo usualmente descrito como uma deterioração de sua estrutura, manifestada pela alteração de várias propriedades físicas (LAL, 1979). Este processo ocasiona além de outros impactos na estrutura do solo, diminuição na porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (DIAS JUNIOR, 2000; SERVADIO et al., 2001) e aumento da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR, 1994; 2000; DIAS JUNIOR, PIERCE, 1996; KONDO, 1998; MIRANDA et al., 2003; SILVA; LIMA; DIAS JUNIOR, 1999). Este aumento da capacidade de suporte de carga do solo pode ser considerado como uma das limitações para que o desenvolvimento florestal mais sustentável seja atingido. Os processos relacionados às operações de colheita florestal podem causar compactação do solo por não haver um controle da umidade do solo ou de sua capacidade de suporte de carga no momento de realização destas operações (DIAS JUNIOR et al., 2003).

Também o emprego crescente da mecanização agrícola tem ocasionado compactação do solo. No setor florestal, as atividades de colheita e baldeio da madeira é a principal causa desse processo. A modelagem da capacidade de suporte de carga do solo permite o desenvolvimento de estratégias de manejo que evitam compactação adicional do solo. A capacidade de suporte de carga do solo é dada pela pressão de pré-consolidação, que representa o valor de pressão que o solo é capaz de suportar sem compactação adicional. É importante registrar que a umidade do solo é o principal fator que controla a sua capacidade de suporte de carga. O decréscimo da pressão de pré-consolidação em função do aumento da umidade do solo pode ser expresso pela equação  $\sigma_p = e^{(a + b\theta)}$ , proposta por

Dias Junior (1994), denominado de modelo de capacidade de suporte de carga (MCSC).

Assim, objetivou-se no presente estudo desenvolver MCSC para os solos Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) cultivados com eucalipto e avaliar o impacto das operações de colheita florestal realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora na camada superficial e subsuperficial de cada classe de solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi conduzido em áreas comerciais cultivadas com eucalipto da EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA, em um PVA de Botucatu, SP, situado na mesorregião do grupo Bauru numa altitude que varia de 800 a 840 m, com clima classificado como Cwa segundo classificação internacional de Koppen (CUNHA et al., 1999), temperatura média anual de 20°C e precipitação média de 1350 mm (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA - CEPAGRI, 2015), LVAd e PVAd, situados em Elias Fausto, SP. O município de Elias Fausto se encontra em uma altitude de 600 m e clima Cwa pela classificação internacional de Koppen (CUNHA et al., 1999), temperatura média de 20°C, precipitação média de 1200 mm e relevo suavemente ondulado (CEPAGRI, 2015), cujas características físicas encontram-se na Tabela A1-1.

A amostragem foi feita em duas etapas; a primeira antes das operações de colheita e baldeio da madeira na entrelinha das árvores para a elaboração dos MCSC e a segunda etapa após essas operações de colheita e baldeio da madeira na linha do rodado após uma passagem do equipamento com a máxima capacidade, trafegando em locais sem resíduos florestais, com interesse de avaliar o impacto desse maquinário na estrutura das classes de solo.

Tabela A1-1 Densidade de partículas (Dp) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)

Classes de Solo	Dp <sup>1</sup>	Argila	Silte	Areia	Classe Textural <sup>2</sup>
	Mg m <sup>-3</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Superficial</b>					
PVA	2,73	460	120	420	Argila
LVAd	2,60	600	170	230	Muito argiloso
PVAd	2,60	680	80	240	Muito argiloso
<b>Subsuperficial</b>					
PVA	2,63	500	200	300	Argila
LVAd	2,60	650	150	200	Muito argiloso
PVAd	2,60	750	140	110	Muito argiloso

<sup>1</sup> Média de três repetições; <sup>2</sup> Segundo Santos et al. (2013)

Fonte: os autores

Em todas as classes de solo foram coletadas amostras de solo indeformadas, em anéis cilíndricos com 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura aproximadamente utilizando o amostrador de Uhland, na camada superficial de 0 a 3 cm e na camada subsuperficial de 30 a 33 cm no PVA e no LVAd e de 27 a 30 cm no PVAd. Em campo, fez-se a abertura de trincheiras no perfil do solo e observou a camada mais resistente à penetração da faca durante o teste de campo. A profundidade de coleta da camada subsuperficial foi determinada como sendo a de maior resistência à penetração nesse diagnóstico de campo. Todas as amostras foram coletadas com preservação da estrutura e após a coleta estas foram envoltas num filme plástico e parafinadas, sendo conduzidas posteriormente ao Laboratório de Física do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras.

As máquinas florestais utilizadas foram o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora. O Feller Büncher possui as seguintes especificações técnicas:

- a) modelo: Feller Büncher 903K, Motor John Deere 6090 H – Tier II 9.0 litros;
- b) potência motor: 300 hp;
- c) torque máximo: 1.270 Nm @ 1.500 rpm;
- d) ventilador do radiador reversível;
- e) força de tração: 331 kN;
- f) torque de giro: 70.503 Nm;
- g) sistema TMC – CONTROLE TOTAL DA MÁQUINA;
- h) cabine florestal ROPS, FOPS e OPS;
- i) massa ou peso de operação sem cabeçote: 33.345 Kg;
- j) massa ou peso operacional: 35.800 kg;
- k) esteiras de garra simples “ou dupla de 24” (610 mm);
- l) material rodante com 09 roletes inferiores e 2 roletes superiores cada lado;
- m) capacidade de levantamento no alcance máximo sem cabeçote: 6.440 Kg;
- n) alcance máximo: 8,4 m;
- o) tanque de combustível: 1.117 L;
- p) opcionais incluídos:
  - Sistema Flex-air – ventilador reversível,
  - AFEX – Sistema de Supressão de Incêndio,
  - contador de árvores,
  - cabeçote modelo FR 22B: Giro do Cabeçote de 312°,
  - capacidade de corte: 22 polegadas,
  - massa ou peso do cabeçote: 3.774 Kg,
  - área de acúmulo: 0,48 m<sup>2</sup>.

O Skidder possui as especificações técnicas:

- a) modelo: Skidder 848 H Arco Duplo, Marca John Deere;
- b) motor eletrônico John Deere 6068 H com controle de emissões Tier III;
- c) potência máxima de 224 hp;

- d) transmissão direta 6 velocidades a frente e 3 a ré;
- e) velocidade máxima de deslocamento a frente: 20 km/h;
- f) velocidade máxima de deslocamento a ré: 14 km/h;
- g) garra John Deere tipo multi-função Sorting/Bunching área: 1,5 m<sup>2</sup>;
- h) tanque de 329 litros;
- i) pneus dianteiros e traseiros Firestone: 30.5-32;
- j) cabine com vidros de policarbonato FOPS, ROPS, OPS;
- k) cabine com ar condicionado;
- l) massa ou Peso Operacional: 17.842 kg;
- m) opcionais incluídos:
  - limpador traseiro,
  - paralama traseiro,
  - alternador 120 Amp,
  - luzes de trabalho.

As especificações técnicas da Garra Traçadora são:

- a) modelo: Escavadeira John Deere 200D LC (Garra Traçadora);
- b) motor John Deere 6068H 6.8 litros;
- c) potência líquida motor: 159 hp @2.150 rpm;
- d) torque máximo: 579 Nm @ 1.300 rpm;
- e) força de tração: 19.240 Kg;
- f) massa ou peso de operação: 20.925 Kg;
- g) torque de giro: 58.640 Nm;
- h) sistema hidráulico com 2 bombas hidráulicas com capacidade de 212L cada;
- i) esteiras de 600 mm;
- j) material rodante com 8 roletes inferiores e 2 superiores de cada lado;
- k) alcance máximo: 9,0 m;
- l) Joysticks Suregrip;
- m) proteções florestais:

- kit de instalação hidráulica,
- tubulações hidráulicas,
- proteções inferiores reforçadas,
- dianteira de policarbonato 13 mm,
- janela lateral direita 6 mm,
- ponteira para sustentação do cabeçote,
- faróis de trabalho,
- ponteira para instalação da garra traçadora.

No laboratório, as amostras passaram por um processo de preparação, sendo retirados o filme plástico e o excesso de solo dos anéis volumétricos, de maneira que o volume de solo a ser avaliado corresponda ao volume do anel. Com o excesso de solo retirados dos anéis, foram realizadas as análises texturais pelo método de Bouyoucos (GEE, BAUDER, 1986) e análise de densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (BLAKE, HARTGE, 1986).

Para a elaboração dos MCSC as amostras foram saturadas e secas naturalmente até a umidade desejada, e em seguida, levadas ao ensaio de compressão uniaxial. Para a avaliação de impacto, as amostras também foram preparadas retirando o excesso de solo e levadas ao ensaio de compressão uniaxial com a umidade natural de campo.

Nos ensaios de compressão uniaxial as amostras foram comprimidas utilizando os consolidômetros da marca Boart Longyear onde foram submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, de acordo com a metodologia de Bowles (1986), modificada por Dias Junior (1994). As pressões foram aplicadas nas amostras até que estas apresentassem 90% da sua máxima deformação, conforme descrito por Taylor (1948). Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa de 105-110°C por 48 horas e posteriormente pesadas, determinando a umidade da amostra durante o ensaio. A pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) foi calculada de acordo com Dias Junior e Pierce (1995) e ajustada em função da umidade ( $\theta$ ) pela equação  $\sigma_p = e^{(a + b\theta)}$ , em que “a” e “b” são os parâmetros de ajuste da equação utilizando

o *software* Sigma Plot 10.0 (2006) sendo os MCSC comparados conforme procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989).

A avaliação dos impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do PVA, do LVAd e do PVAd foram determinadas de acordo com os critérios descritos por Dias Junior et al. (2007) (Figura A1-1).

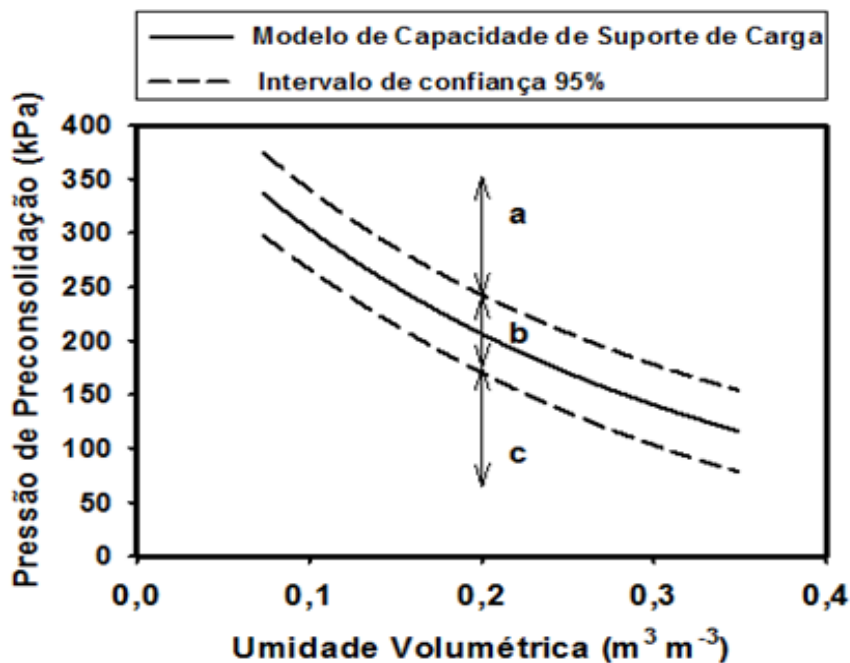


Figura A1-1 Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do PVA, do LVAd e do PVAd

a = região onde já ocorreu compactação do solo; b = região onde não ocorre compactação do solo, mas tende a sofrer compactação nas próximas operações se as pressões aplicadas forem superiores às pressões do limite superior do intervalo de confiança; c = região onde não ocorre compactação do solo

Fonte: Dias Junior et al. (2005)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As operações realizadas com a Garra Traçadora no PVA promoveram aumento da densidade do solo de 12% e redução na porosidade total de 7% na camada superficial, sendo este equipamento mais impactante da camada superficial. As operações realizadas com o Feller Büncher nesta



camada reduziu a porosidade total em 7% e aumentaram a densidade do solo em 10%. Já o Skidder se mostrou menos impactante, reduzindo a porosidade total em 2% e aumentando a densidade do solo em 7% na camada superficial. É importante ressaltar que não foram observadas grandes alterações nos valores da densidade do solo e na porosidade total na camada subsuperficial. Esse valor de densidade antes do manejo foi encontrado por Pincelli, Seixas e Nunes (2014) em avaliação do impacto do Feller Büncher e Skidder na estrutura do PVA nas camadas de 0 a 5 e de 15 a 20 cm, porém esses autores não verificaram aumento da densidade e redução da porosidade provavelmente devido ao tráfego do maquinário ter sido executado sobre os resíduos florestais.

Estes resultados indicam que o maior impacto das operações de colheita florestal na estrutura destas classes de solo ocorreu na camada superficial.

Tabela A1-2 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,63	10		0,40	7
Skidder	1,48	1,59	7	0,43	0,42	2
Garra Traçadora		1,65	12		0,40	7
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,65	1		0,37	3
Skidder	1,63	1,64	1	0,38	0,38	0
Garra Traçadora		1,66	2		0,37	3

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade total inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

Na camada superficial do LVAd (Tabela A1-3), o maior aumento da densidade do solo foi observado para a Garra Traçadora com 16% de aumento na densidade do solo, seguido do Feller Büncher com 11% e o Skidder com 8%. A porosidade total também foi reduzida, sendo que a Garra Traçadora provocou maior redução da porosidade total, sendo igual a 24%, seguido do Feller Büncher com 17% e do Skidder com redução de 12%. Na camada subsuperficial, a Garra Traçadora aumentou a densidade do solo em 10%, seguido pelo Skidder com 6% e pelo Feller Büncher com 5%.

A porosidade total reduziu em 15% para a Garra Traçadora, seguido do Feller Büncher e do Skidder com 7%. Esse aumento da densidade e redução da porosidade também foi observado por Lopes (2003) quando avaliou o impacto das operações realizadas com o Skidder e Clambunk nas camadas de 0 a 15 cm e de 30 a 40 cm para um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa. Em outros trabalhos como o de Seixas e Oliveira Junior (2001) em solos argilosos no período seco, houve aumento de 14,6% na densidade do solo na camada de 5 a 10 cm para o Harvester e Forwarder no período seco.

Estes resultados apontam que as operações de colheita florestal promoveram impactos nas duas camadas. No entanto, a camada superficial foi a que sofreu maior impacto.

Tabela A1-3 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,69	11		0,35	17
Skidder	1,52	1,64	8	0,42	0,37	12
Garra Traçadora		1,76	16		0,32	24

(continua)

Tabela A1-3, Continua

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,61	5		0,38	7
Skidder	1,53	1,62	6	0,41	0,38	7
Garra Traçadora		1,68	10		0,35	15

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade total inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

As operações realizadas com o Feller Büncher no PVAd não alteraram a densidade do solo e a porosidade total nas duas camadas. Na camada superficial a Garra Traçadora aumentou a densidade em 6% e para o Skidder o aumento foi de 18%. A porosidade total foi reduzida em 10% para a Garra Traçadora e 28% para o Skidder. Na camada subsuperficial a Garra Traçadora e o Skidder aumentaram a densidade em 3% para cada equipamento e a porosidade reduziu em 3% para a Garra Traçadora e 5% para o Skidder.

Esse aumento da densidade do solo também foi observado por Szymczak et al. (2014) durante a colheita de pinus em uma área com Latossolo Vermelho distroférico típico, com os mesmos teores de argila e mesma classificação textural, bem como a redução da macroporosidade na camada de 0 a 5 cm. Segundo esses autores, essa compactação é oriunda da intensidade do tráfego de máquinas. Também constataram que ocorreu compactação na camada de 20 a 40 cm devido ao tráfego das máquinas sobre resíduos florestais que favoreceu a distribuição da pressão aplicada sobre o solo. Estes resultados indicam que o maior impacto das operações de colheita florestal ocorreu na camada superficial desta classe de solo.

Tabela A1-4 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,56	0		0,40	0
Skidder	1,56	1,84	18	0,40	0,29	28
Garra Traçadora		1,66	6		0,36	10
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,63	0		0,37	0
Skidder	1,63	1,68	3	0,37	0,35	5
Garra Traçadora		1,67	3		0,36	3

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade total inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

Os coeficientes dos MCSC diferiram estatisticamente nas camadas avaliadas do PVA (Tabela A1-5). Isso indica que a capacidade de suportar carga é variável ao longo do perfil do solo, sendo a camada superficial mais suscetível à compactação (Figura A1-2).

Tabela A1-5 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)

<b>Classe de Solo</b>	<b>Camada (cm)</b>	<b>F</b>	<b>Coefficiente Linear "a"</b>	<b>Coefficiente Angular "b"</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
PVA	0 - 3	-	5,42	2,59	0,93**
PVA	30 - 33	-	6,12	3,19	0,92**
PVA	0-3 x 30-33	Homogêneo	**	*	-

\* significativo a 5%, \*\* significativo a 1%

Fonte: os autores

Para o PVA (Figura A1-2), a camada subsuperficial é mais resistente à degradação da estrutura do que a camada superficial. Isso implica que para essa classe de solo, a carga a ser aplicada na camada superficial para que não

ocorram danos à sua estrutura física, é menor do que a carga necessária para alterar a estrutura física da camada subsuperficial, quando comparados a uma mesma umidade. Oliveira et al. (2011) desenvolvendo o modelo de capacidade de suporte de carga para um Argissolo Amarelo distrocoeso, encontrou a camada de 0 a 20 cm mais resistente à compactação do que a camada de 20 a 40 cm.

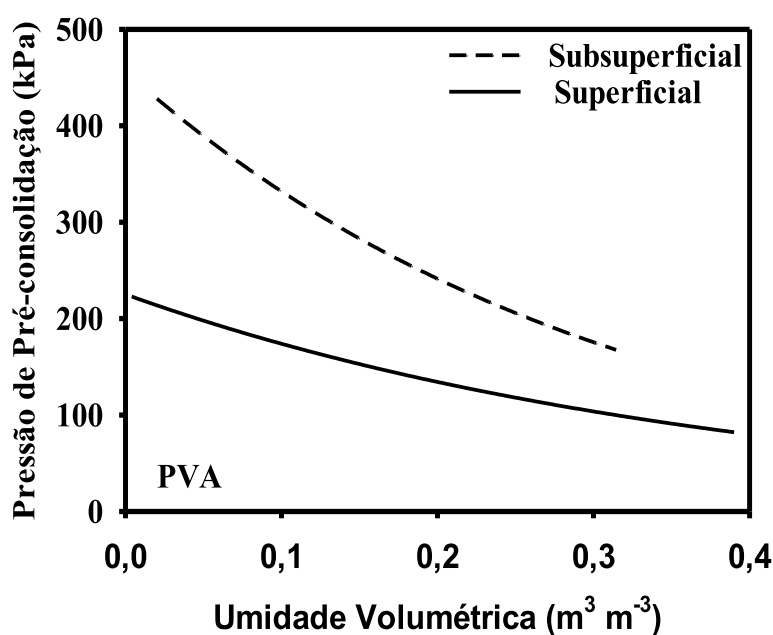


Figura A1-2 Modelos de capacidade de suporte de carga para um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) situado no município de Botucatu-SP, para as duas camadas

Fonte: os autores

Os MCSC das camadas superficial e subsuperficial do LVAd diferiram estatisticamente (Tabela A1-6). A camada subsuperficial do LVAd apresentou maior capacidade suporte de carga que a superficial. Durante a elaboração dos MCSC para um Argissolo Amarelo, Andrade (2014) também encontrou diferença estatística em comparação como o topo do horizonte BA e do horizonte B, em que o topo do horizonte B apresentou maior resistência à compactação com maior capacidade de suporte de carga.

Tabela A1-6 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)

<b>Classe de Solo</b>	<b>Camada (cm)</b>	<b>F</b>	<b>Coefficiente Linear "a"</b>	<b>Coefficiente Angular "b"</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
LVAd	0 - 3	-	6,66	8,01	0,94**
LVAd	30 - 33	-	6,27	4,88	0,92**
LVAd	0-3 x 30-33	Homogêneo	**	**	-

\*\* significativo a 1% e ns não significativo

Fonte: os autores

Os MCSC para LVAd (Figura A1-3) indicaram que a umidade de 12,4% nas duas camadas apresentam mesma capacidade de suporte de carga. Em umidades inferiores a essa, a camada superficial é mais resistente à compactação e a camada subsuperficial é mais suscetível. Em umidades superiores a 12,4% ocorre o inverso, a camada superficial é mais suscetível e a camada subsuperficial é mais resistente à degradação da estrutura do solo.

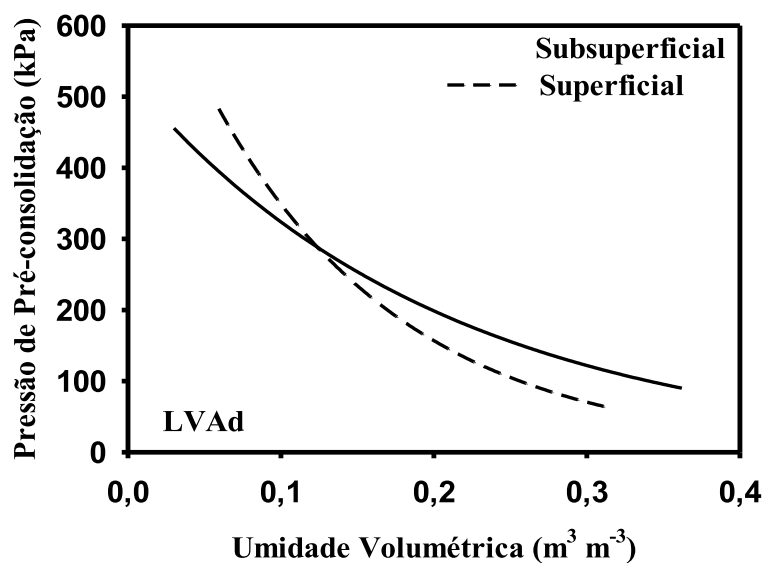


Figura A1-3 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), situado no município de Elias Fausto-SP, na camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

Para o PVAd os MCSC foram estatisticamente iguais (Tabela A1-7). Assim, a capacidade suporte de carga é a mesma para as duas camadas.

Tabela A1-7 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)

Classe de Solo	Camada (cm)	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	R <sup>2</sup>
PVAd	0 - 3	-	6,74	7,13	0,94**
PVAd	30 - 33	-	6,59	6,09	0,94**
PVAd	0-3 x 30-33	Homogêneo	ns	ns	-

\*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Nessa classe de solo avaliada, as duas camadas apresentaram mesma capacidade de suporte de carga (Figura A1-4). Comparando os MCSC de um LVA do cerrado em diferentes manejos com milho e pastagem, Pais (2014)

também encontrou homogeneidade e interação não significativa entre os manejos.

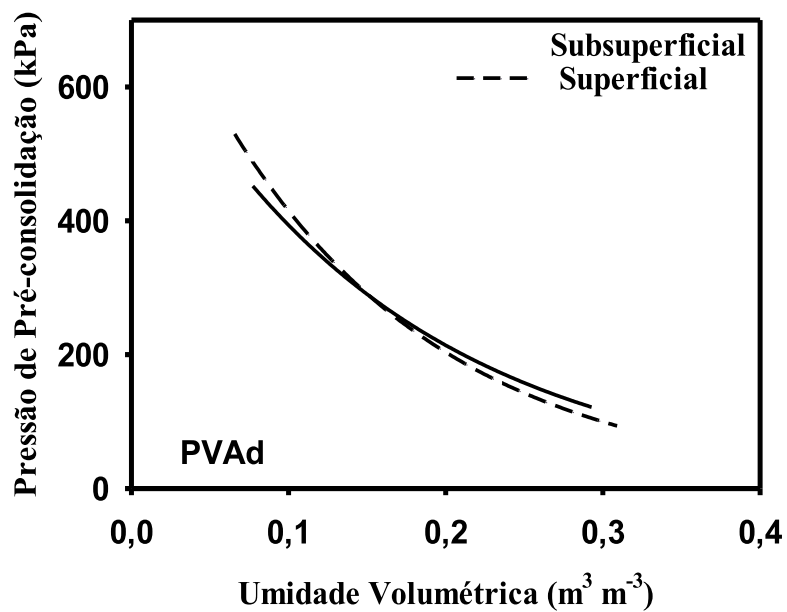


Figura A1-4 Modelos de capacidade de suporte de carga para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), situado no município de Elias Fausto - SP, para as duas camadas avaliadas

Fonte: os autores

Na camada superficial, os MCSC foram homogêneos (Tabela A1-8) e estatisticamente diferentes, mostrando que as classes de solos apresentam comportamentos distintos.



Tabela A1-8 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)

Classes de Solo	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	Dsi Mg m <sup>-3</sup>	R <sup>2</sup>
PVA	-	5,42	2,59	1,48	0,93**
LVAd	-	6,66	8,01	1,52	0,94**
PVAd	-	6,74	7,13	1,51	0,92**
PVA x LVAd	Homogêneo	Ns	**	-	-
PVA x PVAd	Homogêneo	**	**	-	-
LVAd x PVAd	Homogêneo	**	**	-	-

Dsi Densidade do solo inicial; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Comparando as três classes de solo na camada de superficial (Figura A1-5), observa-se que em umidades inferiores a 23%, o PVA é o mais susceptível à compactação e o PVAd é o mais resistente. Entre essas três classes de solo, o PVAd é o mais argiloso e apresentou maior capacidade de suporte de carga. Estes mesmos resultados também foram encontrados por Suzuki et al. (2008), quando compararam a capacidade de suporte de carga para várias classes de solo. Segundo Imhoff, Silva e Fallow (2004), solos mais argilosos apresentam maior capacidade de suporte de carga.

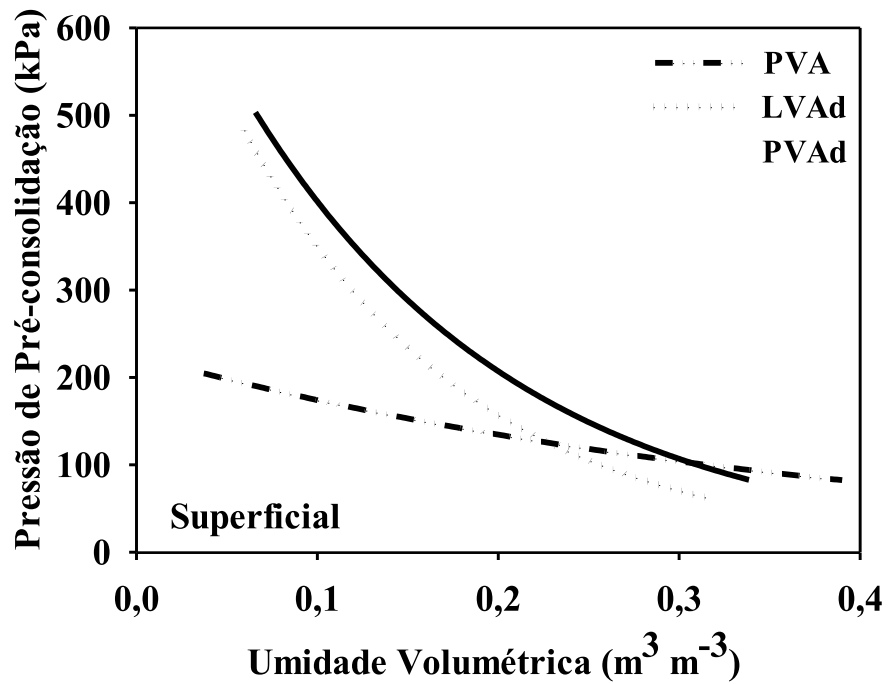


Figura A1-5 Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) na camada superficial

Fonte: os autores

Na camada subsuperficial, os MCSC foram homogêneos (Tabela A1-9) e estatisticamente diferentes, indicando comportamento distinto entre as classes de solo.

Tabela A1-9 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada subsuperficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)

Classes de Solo	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	Dsi Mg m <sup>-3</sup>	R <sup>2</sup>
PVA	-	6,12	3,19	1,63	0,92**
LVAd	-	6,27	4,88	1,53	0,92**
PVAd	-	6,66	6,62	1,51	0,92**
PVA x LVAd	Homogêneo	Ns	**	-	-
PVA x PVAd	Homogêneo	Ns	**	-	-
LVAd x PVAd	Homogêneo	**	ns	-	-

Dsi Densidade do solo inicial; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Comparando-se os MCSC para a camada subsuperficial, observamos que em umidades inferiores a 9% o PVA é o mais suscetível à compactação (Figura A1-6). Quando a umidade do solo supera a umidade de 9%, o PVA passa a ser mais resistente à compactação que o LVAd. Ocorrendo acréscimo de umidade no solo, o PVA é mais suscetível que o PVAd até a umidade de 16%, onde ocorre a mesma capacidade de suportar carga entre essas duas classes de solo. Em umidades superiores a 16%, o PVA é mais resistente à compactação que as outras classes de solo. Na umidade de 22%, o LVAd e o PVAd apresentaram a mesma capacidade de suporte de carga. Quando a umidade do solo é superior a 22%, o LVAd é mais resistente à compactação que o PVAd que por sinal passa a ser mais suscetível. Logo, em umidades inferiores a 22%, para essas duas classes de solo comparadas ocorre o inverso, o LVAd se apresenta mais suscetível enquanto o PVAd se apresenta mais resistente à compactação. Assim, podemos inferir que à medida que o solo apresenta maior suscetibilidade à compactação, mais facilmente será sua deformação e menor sua capacidade de suporte de carga.

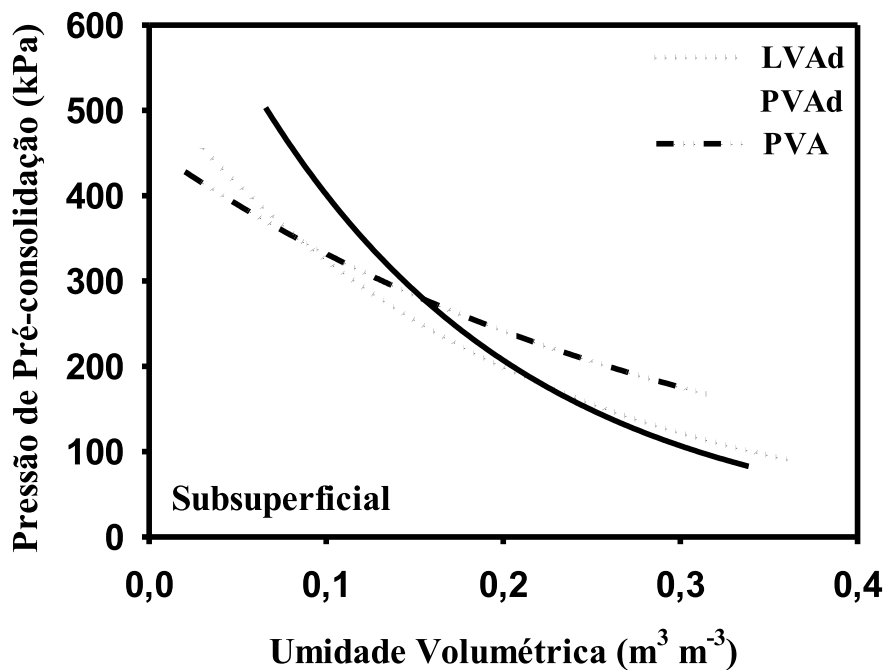


Figura A1-6 Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) na camada subsuperficial

Fonte: os autores

#### 4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARGILOSOS

Nas atividades realizadas com os equipamentos florestais, as classes de solo apresentaram umidades diferentes durante as operações de colheita florestal (Tabela A1-10). As umidades nas quais as operações de colheita florestal foram realizadas variaram de  $0,08 \pm 0,01$  à  $0,24 \pm 0,01$ .

Tabela A1-10 Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal nas camadas avaliadas das respectivas classes de solo

<b>Classes de Solo</b>	<b>Feller Büncher</b>	<b>Skidder</b>	<b>Garra Traçadora</b>
<b>Superficial</b>			
PVA	0,12±0,09 <sup>1</sup>	0,12±0,01	0,10±0,01
LVAd	0,17±0,01	0,20±0,02	0,20±0,02
PVAd	0,21±0,01	0,24±0,01	0,17±0,01
<b>Subsuperficial</b>			
PVA	0,15±0,02	0,09±0,01	0,08±0,01
LVAd	0,14±0,01	0,16±0,01	0,15±0,01
PVAd	0,13±0,01	0,19±0,01	0,17±0,01

<sup>1</sup> Média ± erro padrão. Média de 10 repetições

Fonte: os autores

Na avaliação do impacto das operações de colheita florestal na camada superficial (Figura A1-7), todos os equipamentos provocaram compactação adicional do solo. Na camada subsuperficial, com exceção do PVA, todas as classes de solo apresentaram compactação adicional. O PVA apresentou 90% das amostras compactadas nas operações com o Feller Büncher, seguidos pelo Skidder e pela Garra Traçadora com 80% das amostras compactadas. Essa foi a classe de solo que apresentou maior compactação do solo com média de 83% e o equipamento que promoveu a maior compactação foi o Feller Büncher. Contudo, no LVAd a Garra Traçadora promoveu a maior compactação do solo com 60% das amostras compactadas.

O menor impacto foi promovido pelo Feller Büncher, com 30% das amostras compactadas, sendo o Skidder intermediário, compactando 50% das amostras. O LVAd também apresentou compactação intermediária com 47% das amostras compactadas. Já o PVAd foi a classe de solo que sofreu a menor compactação do solo, com 40% em média das amostras compactadas, sendo o Skidder e a Garra Traçadora, os equipamentos que promoveram a maior compactação, compactando 50% das amostras e o Feller Büncher o menos impactante, com 20% das amostras compactadas.

Entre os equipamentos, a Garra Traçadora promoveu a maior compactação, sendo 63% das amostras compactadas em todas as classes de solo nesta camada. O Feller Büncher foi o menos impactante, compactando 47% das amostras sendo o Skidder intermediário, compactando 60% das amostras. Ainda que o Skidder e o Feller Büncher tenham promovido menor compactação adicional, ainda requer certa atenção para o manejo, principalmente o Skidder, que promoveu o maior aumento da densidade do solo e maior incremento na redução da porosidade total na camada superficial, como demonstrado na Tabela A1-4.

Na camada subsuperficial, o PVA não apresentou amostras compactadas em todos os equipamentos, indicando, portanto, que o manejo não está alterando a camada subsuperficial. Para o LVAd na camada subsuperficial, o Feller Büncher promoveu a maior degradação estrutural com 40% das amostras compactadas, seguidos pela Garra Traçadora e pelo Skidder, com 30% e 20% das amostras compactadas respectivamente. No PVAd todos os equipamentos apresentaram o mesmo percentual de compactação, com 30% das amostras compactadas.

Em média, o LVAd e o PVAd apresentaram 30% das amostras compactadas, sendo o PVA o único que não apresentou degradação da estrutura nessa camada. Na camada subsuperficial, o Feller Büncher foi o mais impactante, com 23% de compactação média, seguidos pela Garra Traçadora com 20% das amostras compactadas e pelo Skidder com 17% das amostras compactadas.

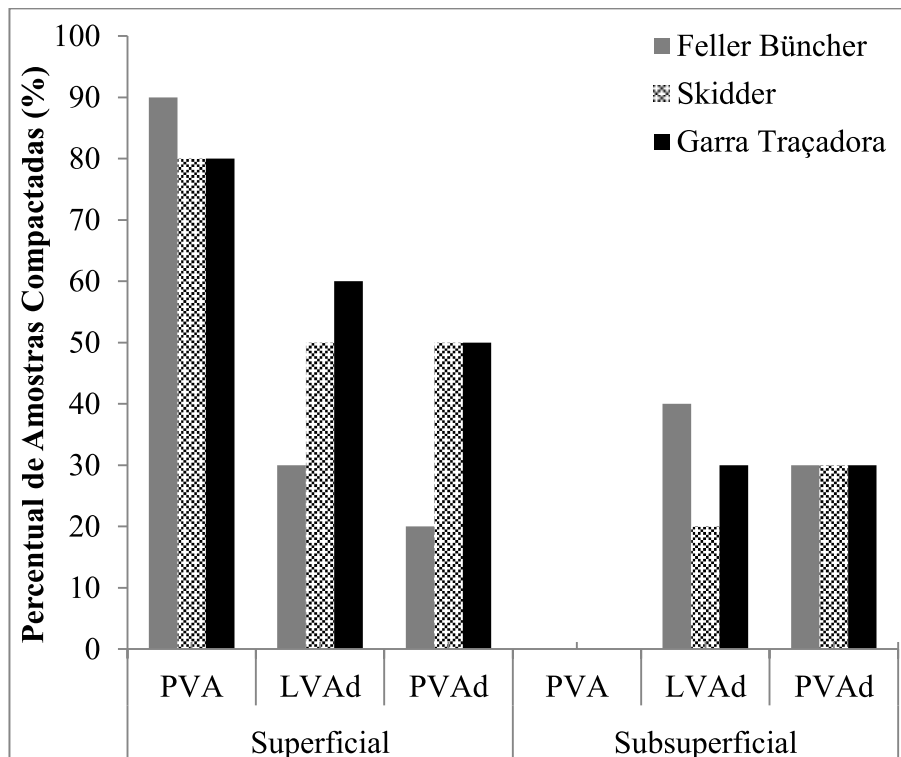


Figura A1-7 Porcentagem de amostras compactadas realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora para o PVA, LVAd e PVAd na camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

## 5 CONCLUSÕES

Em geral, na camada superficial, o PVAd é o mais resistente à compactação e o PVA o mais susceptível. Na camada subsuperficial, o PVAd é o mais resistente à compactação em umidades menores do que  $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto o PVA é o mais resistente à compactação em umidades maiores do que  $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

As operações mecanizadas vêm causando compactação adicional na estrutura de todas as classes de solo na camada superficial e subsuperficial, com exceção do PVA na camada subsuperficial.

A Garra Traçadora é o equipamento que causa maior compactação nas duas camadas dos solos argilosos avaliados.

Na camada superficial o PVA apresenta a maior compactação e na camada subsuperficial, o PVAd e o LVAd apresentam mesmo percentual de compactação final.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. L. C. **Efeito do maquinário de colheita florestal na compactação do solo**. 2014. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 377-382.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3rd. ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. [2015]. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

CUNHA, A. R. et al. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA/UNESP, 1999. v. 1, p. 487-490.

DIAS JUNIOR, M. S. A soil mechanics approach study soil compaction In: ACHYUTHAN, H. **Soil and soil physics in continental environment**. Chennai: Allied Publishers Private, 2003. p. 179-199.



\_\_\_\_\_. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho-Amarelo situado em áreas experimentais da CENIBRA:** Relatório Técnico. Belo Oriente: CENIBRA, 2000.

\_\_\_\_\_. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.** 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - East Lansing State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, 2003.

\_\_\_\_\_. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

\_\_\_\_\_. Traffic effects on the preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, May/June 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, jun. 1996.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis., In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods.** Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 383-411.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach.

**Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 133-142, Sept. 2001.

HORN, R.; VAN DEN AKKER, J. J. H.; ARVIDSSON, J. **Subsoil compaction**: sistribution, processes and consequences. Reiskirchen: Catena-Verlag, 2000. (Advances in Geocology, n. 32).

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, Jan. 2004.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

LAL, L. The role of Properties in Maintaining Productivity of Soil in the Tropics. In: LAL, R.; GREENLAND, D. J. (eds). **Soil physical properties and crop production in the tropics**. London: J. Wiley & Sons, 1979. p. 3-6.

LOPES, S. E. **Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de máquinas de arraste de madeira**. 2003. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

MIRANDA, E. E. V. et al. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, n. esp., p. 1506-1515, dez. 2003.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compressibilidade de um Argissolo amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 435-442, 2011.

PAIS, P. S. M. **Atributos físicos, capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos e manejos**. 2014. 91 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; SEIXAS, F.; NUNES, R. Compactação e fertilidade do solo após colheita do eucalipto utilizando Feller Büncher e Skidder. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 191-198, abr./jun. 2014.

SANTOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

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

SERVADIO, P. et al. Effect on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 143-155, 2001.

SIGMA PLOT. **Scientific Graphing Software**: version 8.0. San Rafael: Jandel Corporation, 2006.

SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 219-226, abr./jun.1999.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th. ed. Iowa: University Press Ames, 1989.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

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**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 641-648, jul./ago. 2014.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.

**ARTIGO 2 - Solos arenosos****IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA  
ESTRUTURA DE SOLOS ARENOSOS CULTIVADOS COM  
EUCALIPTO<sup>1</sup>**Zélio Resende de Souza<sup>2</sup>, Moacir de Souza Dias Junior<sup>3</sup><sup>1</sup> Parte da dissertação do primeiro autor<sup>2</sup> Mestrando do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras<sup>3</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras**RESUMO**

A produção de madeira em áreas florestais depende, sobretudo, do manejo com o maquinário e equipamentos nas diversas áreas de maneira que não promova a compactação dos solos, e assim de manejá-lo de forma sustentável e duradoura. Entre as diversas propriedades do solo usadas na avaliação da compactação, a pressão de pré-consolidação tem sido empregada como indicadora da máxima pressão a ser aplicada ao solo sem que ocorra compactação adicional. Assim, objetivou-se com esse trabalho desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para solos arenosos do município de Botucatu-SP, sendo um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e um Neossolo Quartzarênico (RQ) cultivados com eucalipto na camada superficial e na camada de maior resistência à penetração determinada previamente no campo, sendo a camada subsuperficial, onde foram coletadas as amostras, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. A partir dos MCSC, avaliou-se o impacto do manejo florestal realizado com Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nestas classes de solo nas duas camadas. Para a elaboração dos MCSC foram coletadas 15 amostras em cada camada e em cada classe de solo, resultando em 90 amostras. Para a avaliação dos impactos foram coletadas 10 amostras em cada classe de solo e em cada camada amostrada para cada equipamento avaliado. Os MCSC diferiram estatisticamente para as diferentes camadas e classes de solo. Os resultados indicam que houve compactação na camada superficial e na camada subsuperficial em todas as classes de solo, com exceção do equipamento Skidder no LVA na camada subsuperficial, em que não se observou compactação. O LVA foi o solo mais impactado e o Skidder foi o equipamento que promoveu a maior compactação do solo.

Palavras-chave: Compactação do solo. Pressão de pré-consolidação. Manejo do solo.

## ABSTRACT

The continuity of wood and forest production relies on the mechanized management practices with different machinery and equipment that are currently performed on different sites. Thus, it is necessary to assess the behavior of each soil class in order to manage it in a sustainable and long lasting way, preventing the occurrence of soil compaction. Among the different soil attributes used for assessing soil compaction, the precompression stress has been recognized as an indicator of the maximum pressure that should be applied to soils without additional compaction. This soil property has been helpful for decision making and management practices with the aid of the soil load bearing capacity models (LBCM), which relate the decrease of precompression stress as a function of increase on soil water content. The aim of this work was to generate LBCM for a Red-Yellow Latossolo (LVA), a Red-Yellow dystrophic Latossolo (LVAd4) and a Neossolo Quartzarênico (RQ), according to Brazilian Soil Classification System, at two soil layers, 0-3 cm, the surface layer, and at 27-30 cm for the LVA and the LVAd4, and the 25-28 cm layer for the RQ, which correspond to the layers with highest mechanical resistance on field diagnosis. The LBCM were also used to assess the impact on soil structure of mechanized operations performed with Feller Buncher, Skidder and Grapple Saw on the aforementioned soils and layers. The LBCM were statistically different for each layer and soil evaluated. The results point out that compaction has occurred on all soil classes and with all the evaluated equipment on both surface and depth layers, except on the 27-30 cm layer from the LVA after operations with the Skidder, in which there was no additional compaction.

Keywords: Soil compaction. Precompression stress. Soil management.

## 1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem sido apontada como um dos principais fatores responsáveis pela deterioração da estrutura dos solos (DIAS JUNIOR et al., 2007) oriunda do deslocamento de máquinas e equipamentos nas áreas agrícolas em geral (CANILLAS, SALOKHE, 2002). Na área florestal, a compactação está relacionada principalmente com o tráfego de máquinas durante as etapas de colheita e baldeio da madeira (DEDECEK; GAVA, 2005; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; SILVA et al., 2007) e com a

intensidade desse tráfego, o qual pode ser aleatório ou no mesmo local (HAMZA; ANDERSON, 2005; RAPER, 2005; SCHAFFER et al., 2008; SILVA; DIAS JUNIOR; LEITE, 2007) contribuindo para a alteração do arranjo das partículas. Segundo Ferreira (2010), o monitoramento da densidade do solo ao longo dos processos de exploração de uso é de fundamental importância para um manejo sustentável do solo. A preservação da estrutura está relacionada com a capacidade de suporte de carga do solo, podendo ser determinada nos ensaios de compressão uniaxial para solos parcialmente saturados (PIRES et al., 2012).

É importante conhecer a capacidade de suporte de carga de cada classe solo a fim de manejá-lo de modo condizente com a sua estrutura evitando a compactação. Os Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) desenvolvidos por Dias Junior (1994) são elaborados através das pressões de pré-consolidação, que representa a máxima pressão que o solo é capaz de suportar sem causar compactação adicional, em função da umidade do solo.

Objetivou-se no presente trabalho elaborar os MCSC e avaliar os impactos das operações de colheita e baldeio da madeira realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ), situados no município de Botucatu-SP cultivados com eucalipto na camada superficial e subsuperficial de cada classe de solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo foi conduzido em áreas comerciais cultivadas com eucalipto da EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA, em uma área de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), uma área de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e em uma área de Neossolo Quartzarênico (RQ), do município de Botucatu-SP, situado na mesorregião do Grupo Bauru. Os solos dessa região são oriundos de derramamento de rochas vulcânicas, a

temperatura média anual é de 20°C, a altitude varia de 800 a 840 metros, com precipitação média anual de 1350 mm (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI, 2015), sendo o clima classificado como Cwa pela classificação internacional de Koppen (CUNHA et al., 1999).

As máquinas florestais utilizadas foram o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora, com as especificações técnicas expostas a seguir.

## 2.1 Feller Büncher

- a) modelo: Feller Büncher 903K, Motor John Deere 6090 H – Tier II 9.0 litros;
- b) potência motor: 300 hp;
- c) torque máximo: 1.270 Nm @ 1.500 rpm;
- d) ventilador do radiador reversível;
- e) força de tração: 331 kN;
- f) torque de giro: 70.503 Nm;
- g) sistema TMC – CONTROLE TOTAL DA MÁQUINA;
- h) cabine florestal ROPS, FOPS e OPS;
- i) massa ou peso de operação sem cabeçote: 33.345 Kg;
- j) massa ou peso operacional: 35.800 kg;
- k) esteiras de garra simples “ou dupla de 24” (610 mm);
- l) material rodante com 09 roletes inferiores e 2 roletes superiores cada lado;
- m) capacidade de levantamento no alcance máximo sem cabeçote: 6.440 Kg;
- n) alcance máximo: 8,4 m;
- o) tanque de combustível: 1.117 l;
- p) opcionais incluídos:
  - Sistema Flex-Air – ventilador reversível,
  - AFEX – Sistema de Supressão de Incêndio,



- contador de árvores,
- cabeçote modelo FR 22B: Giro do Cabeçote de 312°,
- capacidade de corte: 22 polegadas,
- massa ou peso do cabeçote: 3.774 Kg,
- área de acúmulo: 0,48 m<sup>2</sup>.

## 2.2 Skidder

- a) modelo: Skidder 848 H Arco Duplo, Marca John Deere;
- b) motor eletrônico John Deere 6068 H com controle de emissões Tier III;
- c) potência máxima de 224 hp;
- d) transmissão direta 6 velocidades a frente e 3 a ré;
- e) velocidade máxima de deslocamento a frente: 20 km/h;
- f) velocidade máxima de deslocamento a ré: 14 km/h;
- g) garra John Deere tipo multi-função Sorting/Bunching área: 1,5 m<sup>2</sup>;
- h) tanque de 329 litros;
- i) pneus dianteiros e traseiros Firestone: 30.5-32;
- j) cabine com vidros de policarbonato FOPS, ROPS, OPS;
- k) cabine com ar condicionado;
- l) massa ou peso operacional: 17.842 kg;
- m) opcionais incluídos:
  - limpador traseiro;
  - paralama traseiro;
  - alternador 120 Amp;
  - luzes de trabalho.

## 2.3 Garra Traçadora

- a) modelo: escavadeira John Deere 200D LC (garra traçadora);

- b) motor John Deere 6068H 6.8 litros;
- c) potência líquida motor: 159 HP @ 2.150 rpm;
- d) torque máximo: 579 Nm @ 1.300 rpm;
- e) força de tração: 19.240 kg;
- f) massa ou peso de operação: 20.925 kg;
- g) torque de giro: 58.640 nm;
- h) sistema hidráulico com 2 Bombas Hidráulicas com capacidade de 212L cada;
- i) esteiras de 600 mm;
- j) material rodante com 8 roletes inferiores e 2 superiores de cada lado;
- k) alcance máximo: 9,0 m;
- l) Joysticks Suregrip;
- m) proteções florestais:
  - kit de instalação hidráulica;
  - tubulações hidráulicas;
  - proteções inferiores reforçadas;
  - janela dianteira de policarbonato 13 mm;
  - janela lateral direita 6 mm;
  - ponteira para instalação da garra traçadora.

A amostragem se obteve a partir de duas etapas. A primeira foi realizada antes das operações de colheita e baldeio da madeira na entrelinha do plantio dos eucaliptos para a elaboração dos Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC). A segunda etapa foi realizada em sequência das operações de colheita e baldeio da madeira na linha do rodado dos equipamentos florestais após uma única passagem do maquinário com carga máxima, trafegando no solo sem resíduos florestais, no intuito de avaliar o impacto dos equipamentos na estrutura das respectivas classes de solo.

Em todas as classes de solo foram coletadas amostras na camada de 0 a 3 cm denominada de camada superficial e na camada de 27 a 30 cm no LVA e no LVd e, também na camada de 25 a 28 cm no RQ, as quais foram

denominadas como camada subsuperficial. Como procedimento, realizou-se a abertura de trincheiras em campo e verificou-se a camada mais resistente à penetração da faca no teste de campo, a qual foi determinada como a profundidade a ser amostrada. Para a coleta das amostras, foi utilizado o amostrador de Uhlrad, com anéis cilíndricos de dimensões aproximadas de 2,5 cm de altura e 6,4 cm de diâmetro. Todas as amostras foram coletadas com preservação da estrutura, mantendo assim a integridade física das amostras, as quais após a coleta foram envoltas em um filme plástico e parafinadas, sendo conduzidas posteriormente ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras.

No laboratório, as amostras passaram por um processo de preparação, retirando primeiramente o filme plástico e o excesso de solo dos anéis volumétricos, de maneira que o volume de solo a ser avaliado corresponde ao volume do anel. Com o excesso de solo devidamente retirado dos anéis, foram feitas as análises texturais pelo método de Bouyoucos (GEE; BAUDER, 1986) das respectivas classes de solo e análise de densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986) (Tabela A2-1).

Tabela A2-1 Densidade de partículas ( $D_p$ ) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), e do Neossolo Quartzarênico (RQ)

Classes de Solo	$D_p$ <sup>1</sup>	Argila	Silte	Areia	Classe Textural <sup>2</sup>
	Mg m <sup>-3</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Superficial</b>					
LVd	2,64	250	20	730	Franco Argilo Arenoso
LVA	2,50	100	0	900	Areia
RQ	2,53	50	40	910	Areia
<b>Subsuperficial</b>					
LVd	2,70	240	40	720	Franco Argilo Arenoso
LVA	2,44	120	0	880	Areia Franca
RQ	2,60	70	20	910	Areia

<sup>1</sup>Média de três repetições; <sup>2</sup>Segundo Santos et al. (2013)

Fonte: os autores

Para a elaboração dos MCSC as amostras foram saturadas e secas naturalmente até a umidade desejada, sendo então realizado o ensaio de compressão uniaxial. Com a finalidade de avaliar os impactos, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados nas amostras com a umidade na qual as operações foram realizadas no campo.

Nos ensaios de compressão uniaxial, as amostras foram comprimidas utilizando consolidômetros da marca Boart Longyear sendo submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, de acordo com a metodologia de Bowles (1986), modificada por Dias Junior (1994). As pressões foram aplicadas nas amostras até que estas apresentaram 90% da sua máxima deformação, conforme descrito por Taylor (1948). A pressão de pré-consolidação foi determinada de acordo com Dias Junior, Pierce (1995). Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105-110°C por 48 horas, sendo posteriormente pesadas, determinando a umidade da amostra durante o ensaio. A pressão de pré-consolidação foi calculada de acordo com Dias Junior e Pierce (1995). A pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) foi ajustada em função da umidade ( $\theta$ ) pela equação  $\sigma_p = e^{(a + b\theta)}$ , em que “a” e “b” são os parâmetros de ajuste da equação utilizando o *software* Sigma Plot 10.0

(2006) sendo os MCSC comparados conforme procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989).

A avaliação dos impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do LVA, LVd e do RQ foram determinadas de acordo com os critérios descritos por Dias Junior et al. (2007) (Figura A2-1).

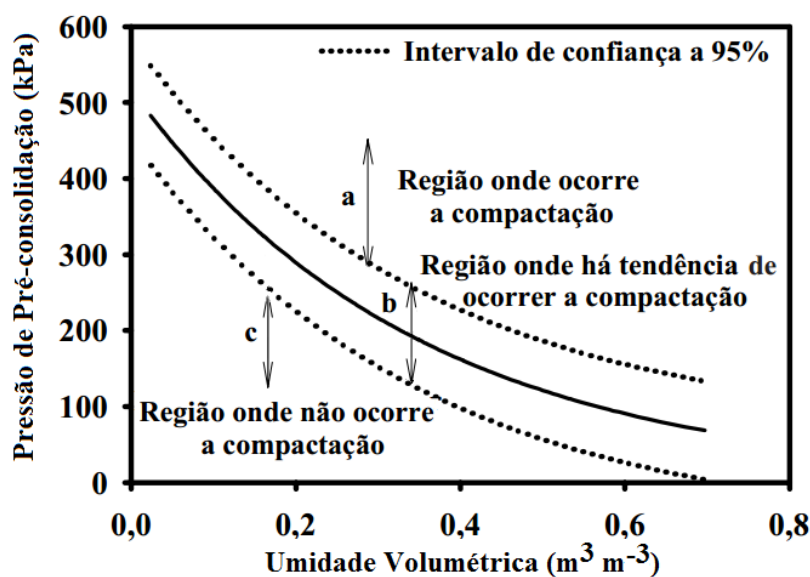


Figura A2-1 Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do LVA, LVd e RQ

a = região onde já ocorreu compactação do solo; b = região onde não ocorre compactação do solo, mas tende a sofrer compactação nas próximas operações se as pressões aplicadas forem superiores do que as pressões do limite superior do intervalo de confiança; c = região onde não ocorre compactação do solo

Fonte: Dias Junior et al. (2007)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As operações realizadas com a Garra Traçadora no LVA promoveu aumento de 13% na densidade do solo e redução de 22% na porosidade total do solo na camada superficial (Tabela A2-2) sendo este equipamento o que promoveu maior alteração nestas propriedades. O Feller Büncher aumentou em 8% a densidade do solo e reduziu a porosidade total em 14%. Já o Skidder aumentou em 5% a densidade do solo e reduziu a porosidade total

em 8%. Seixas e Oliveira Junior (2001), em uma avaliação de impacto do manejo com o Feller Büncher e Skidder juntos em uma classe de solo com 61% de areia, na condição de solo seco com 10% de umidade observaram um aumento da densidade do solo de 14,6% na camada de 5 a 10 cm e de 3,7% na camada de 12,5 a 17,5 cm. Esses mesmos autores verificaram redução da macroporosidade de 53% e 43% nas duas camadas citadas.

Na camada subsuperficial, a Garra Traçadora também promoveu alteração das propriedades físicas do solo, aumentando a densidade do solo em 9% e reduzindo a porosidade total em 17%. O Feller Büncher provocou aumento de 6% na densidade do solo e redução da porosidade total de 11% e o Skidder, aumentou em 5% a densidade do solo e a porosidade total foi reduzida em 8%.

Tabela A2-2 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

<b>Equipa Mento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,72	8		0,31	14
Skidder	1,59	1,67	5	0,36	0,33	8
Garra Traçadora		1,80	13		0,28	22
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,67	6		0,32	11
Skidder	1,57	1,64	5	0,36	0,33	8
Garra Traçadora		1,71	9		0,30	17

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

As operações realizadas com esses equipamentos no LVd também provocaram alterações das propriedades físicas (Tabela A2-3). Na camada superficial, o Skidder foi o mais impactante, pois aumentou a densidade do solo em 16% e reduziu a porosidade total em 19%. Szymczak et al. (2014), avaliando o impacto da colheita florestal com Harvester e Forwarder em um

Latossolo Vermelho, verificaram aumento da densidade do solo em 15,7% e redução de 57% da porosidade total na camada de 0 a 5 cm, indicando que estes equipamentos vem degradando a estrutura do solo. O Feller Büncher aumentou a densidade do solo em 12% e reduziu a porosidade total em 15% e a Garra Traçadora aumentou a densidade do solo em 10% e reduziu a porosidade total em 13%.

Na camada subsuperficial, a maior alteração nas propriedades físicas do solo foi observada para as operações realizadas com o Feller Büncher, que aumentou a densidade do solo em 6% e reduziu a porosidade total em 11%, seguidos pela Garra Traçadora, com aumento da densidade do solo em 6% e redução da porosidade total em 7% e pelo Skidder, com aumento de 4% da densidade do solo e redução da porosidade total de 4%.

Tabela A2-3 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,55	12		0,41	15
Skidder	1,38	1,60	16	0,48	0,39	19
Garra Traçadora		1,52	10		0,42	13
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,55	6		0,41	11
Skidder	1,46	1,52	4	0,46	0,44	4
Garra Traçadora		1,54	6		0,43	7

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

Ao avaliar as consequências do manejo com esses mesmos equipamentos no RQ foi constatado que essa classe de solo apresenta uma degradação mais preocupante (Tabela A2-4).

Vimos que as operações realizadas com a Garra Traçadora na camada superficial foram as mais impactantes, estas promoveram aumento da densidade do solo de 24% e redução da porosidade total em 36%, seguido do Skidder e Feller Büncher, que aumentaram a densidade do solo em 20% e 16% respectivamente, e redução da porosidade total em 29% e 24%, respectivamente. Seixas e Oliveira Junior (2001) avaliando uma areia quartzosa, constataram que a densidade do solo aumentou em 8,2% na camada de 5 a 10 cm e a macroporosidade reduziu em 18,6%.

Na camada subsuperficial, os equipamentos apresentaram a mesma sequência de alterações das propriedades físicas do solo, em que a Garra Traçadora aumentou em 8% a densidade do solo e reduziu a porosidade total em 14% seguidos pelo Skidder, com aumento da densidade do solo em 7% e redução da porosidade total em 11% e do Feller Büncher, com aumento da densidade do solo em 5% e redução da porosidade total em 8%. Seixas e Oliveira Junior (2001) encontraram para a camada de 12,5 a 17,5 cm redução da macroporosidade de 14,3% e o aumento da densidade do solo de 7%. Pelissari et al. (2013), estudando os atributos físicos em uma área com eucalipto, também observaram redução da porosidade total e aumento da densidade do solo para essa mesma classe de solo. Para esses autores, estas alterações estão associadas ao tráfego do maquinário florestal durante a colheita da madeira sem respeitar a umidade do solo apropriada para a realização destas operações, resultando na compactação adicional do solo.



Tabela A2-4 Densidade do solo e porosidade total antes e após as operações de colheita florestal no Neossolo Quartzarênico (RQ)

<b>Equipamento</b>	<b>Dsi<sup>1</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Dsf<sup>2</sup> Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>Aumento percentual</b>	<b>PTi<sup>1</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>PTf<sup>2</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup></b>	<b>Redução percentual</b>
<b>Superficial</b>						
Feller Büncher		1,71	16		0,32	24
Skidder	1,48	1,77	20	0,42	0,30	29
Garra Traçadora		1,84	24		0,27	36
<b>Subsuperficial</b>						
Feller Büncher		1,71	5		0,34	8
Skidder	1,63	1,74	7	0,37	0,33	11
Garra Traçadora		1,76	8		0,32	14

Dsi = Densidade do solo inicial; Dsf = Densidade do solo após o tráfego; PTi = Porosidade inicial; PTf = Porosidade total após o tráfego; <sup>1</sup> média de 15 repetições; <sup>2</sup> média de 10 repetições

Fonte: os autores

Os MCSC diferiram estatisticamente para as duas camadas do LVA (Tabela A2-5). Silva, Dias Junior e Leite (2011), durante a elaboração os MCSC para um LVA, encontraram mesma capacidade de suporte de carga para as camadas de 0 a 3 e de 10 a 13 cm, divergindo destes resultados, em que o comportamento entre as duas camadas foram diferentes. Em outro trabalho avaliando a estrutura do LVA, Pais (2011) observou que os MCSC também foram estatisticamente diferentes para as camadas de 0 a 3, de 10 a 13 e de 25 a 28 cm em vários sistemas de manejos.

Tabela A2-5 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989) para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

Classe de Solo	Camada (cm)	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	R <sup>2</sup>
LVA	0 - 3	-	5,58	2,86	0,93**
LVA	30 - 33	-	6,15	5,71	0,91**
LVA	0-3 x 27-30	Homogêneo	ns	**	-

\*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Os MCSC para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), na umidade de 20% apresentaram a mesma capacidade de suporte de carga (Figura A2-2). Em umidades inferiores a 20%, a camada superficial é mais suscetível à compactação e a camada subsuperficial é mais resistente. Já para umidades superiores à 20%, ocorre o inverso, isto é, a camada subsuperficial passa a ser mais suscetível à compactação e a camada superficial mais resistente. O mesmo comportamento foi observado por Pais (2011) no manejo com grade de discos para o LVA, porém em outras condições de umidade.

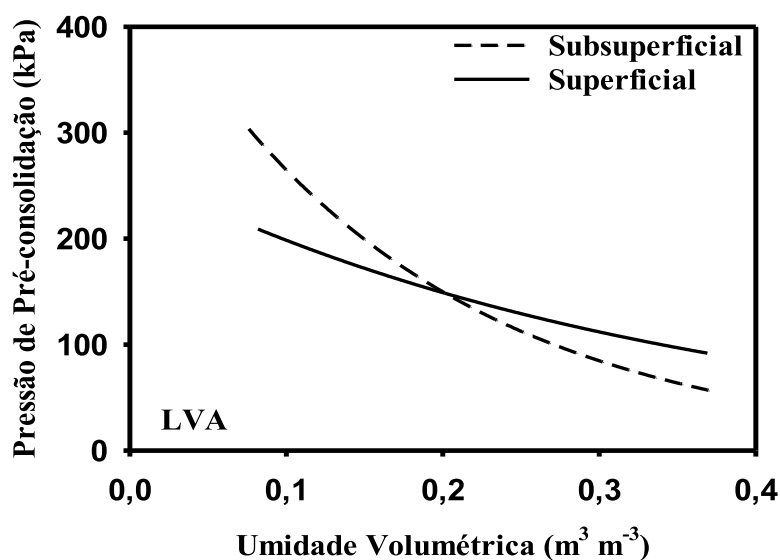


Figura A2-2 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), situado no município de Botucatu-SP, para a camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

Comparando as camadas do LVd (Tabela A2-6), os MCSC não apresentaram diferença estatística. Estes resultados concordam com o trabalho de Martins et al. (2013) que ao compararem os MCSC para um Latossolo Vermelho (LV) encontraram mesma capacidade suporte de carga para a camada superficial e a camada subsuperficial.

Tabela A2-6 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Classe de Solo	Camada (cm)	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	R <sup>2</sup>
LVd	0 - 3	-	6,52	6,01	0,90**
LVd	27 - 30	-	6,82	7,40	0,92**
LVd	0-3 x 27-30	Homogêneo	ns	ns	-

\*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Os MCSC do LVd apresentaram a mesma capacidade de suporte de carga nas duas camadas (Figura A2-3).

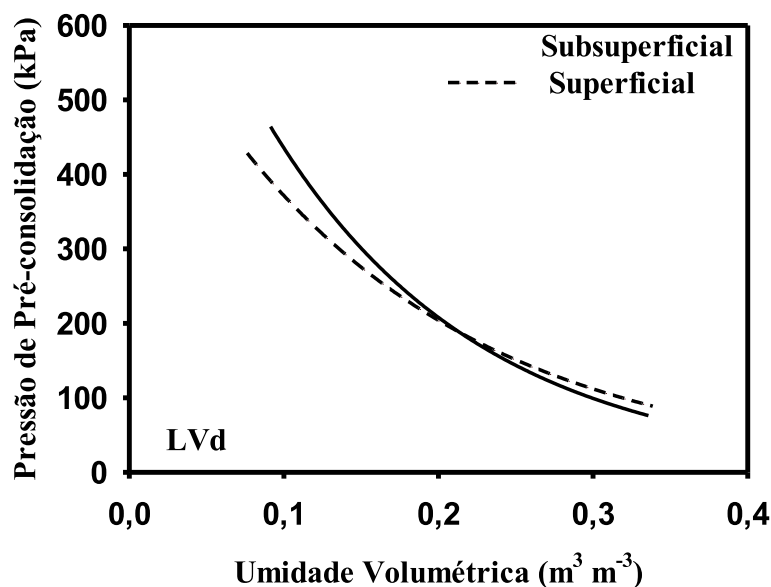


Figura A2-3 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd), do município de Botucatu - SP, para a camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

As duas camadas do Neossolo Quartzarênico (RQ) foram homogêneas (Tabela A2-7) e diferiram estatisticamente indicando comportamento distinto entre elas.

Tabela A2-7 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989) para o Neossolo Quartzarênico (RQ)

Classe de Solo	Camada (cm)	F	Coefficiente Linear "a"	Coefficiente Angular "b"	R <sup>2</sup>
RQ	0 - 3	-	5,86	4,99	0,92**
RQ	25 - 28	-	5,86	3,65	0,96**
RQ	0-3 x 25-28	Homogêneo	**	**	-

\* significativo a 5%, \*\* significativo a 1%

Fonte: os autores

Os MCSC para o RQ na camada superficial e subsuperficial diferiram estatisticamente (Figura A2-4). Nota-se que a camada superficial é mais suscetível à compactação enquanto que a camada subsuperficial é mais resistente.

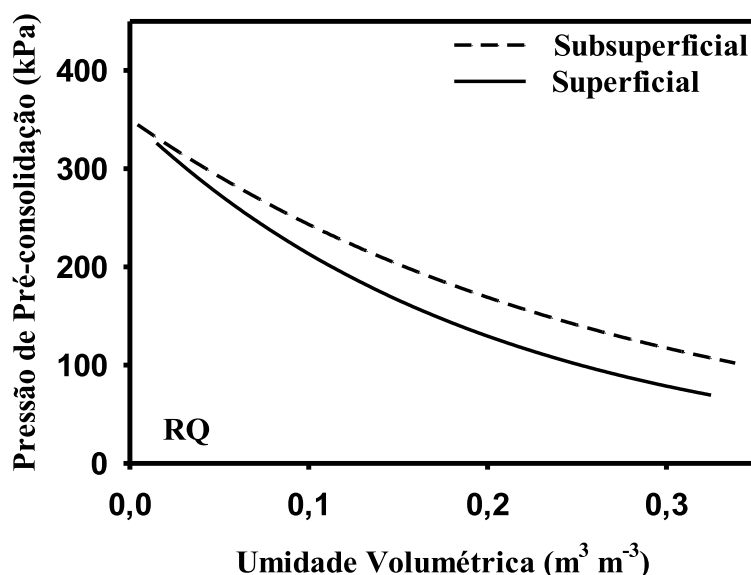


Figura A2-4 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Neossolo Quartzarênico (RQ), do município de Botucatu - SP, para a camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

Os modelos de capacidade de suporte de carga do LVA, LVd e o RQ foram homogêneos na camada superficial (Tabela A2-8) e estatisticamente diferentes, indicando que as classes de solo apresentam comportamentos distintos.

Tabela A2-8 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ)

<b>Classes de Solo</b>	<b>F</b>	<b>Coefficiente Linear "a"</b>	<b>Coefficiente Angular "b"</b>	<b>Dsi Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
LVA	-	5,58	2,86	1,59	0,93**
LVd	-	6,52	6,01	1,51	0,92**
RQ	-	5,86	4,99	1,48	0,92**
LVA x LVd	Homogêneo	**	**	-	-
LVA x RQ	Homogêneo	ns	**	-	-
LVd x RQ	Homogêneo	**	ns	-	-

Dsi Densidade do solo inicial; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Para as classes de solos avaliadas na camada superficial, em umidades menores do que 29% o LVd é o mais resistente à compactação do que o LVA e o RQ, sendo entretanto mais suscetível à compactação do que o LVA em umidades superiores à 29% (Figura A2-5). Para umidades menores do que 13%, o LVA se mostra mais suscetível à compactação. Para umidades entre 13% e 29% o LVA é mais resistente à compactação do que o RQ.

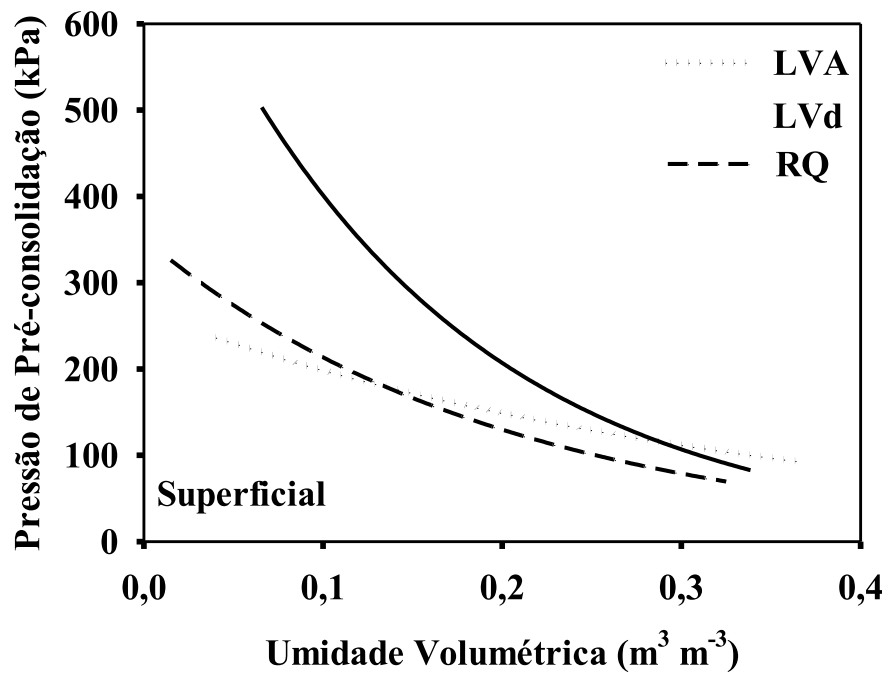


Figura A2-5 Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada superficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Neossolo Quartzarênico (RQ)

Fonte: os autores

Na camada subsuperficial as classes de solo dos modelos de capacidade de suporte de carga também foram estatisticamente diferentes (Tabela A2-9) e homogêneos, mostrando que as essas classes de solo apresentam comportamento distintos.

Tabela A2-9 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada subsuperficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ)

<b>Classes de Solo</b>	<b>F</b>	<b>Coefficiente Linear "a"</b>	<b>Coefficiente Angular "b"</b>	<b>Dsi Mg m<sup>-3</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
LVA	-	6,12	3,19	1,57	0,92**
LVd	-	6,27	4,88	1,51	0,92**
RQ	-	6,66	6,62	1,63	0,92**
LVA x LVd	Homogêneo	**	ns	-	-
LVA x RQ	Homogêneo	ns	*	-	-
LVd x RQ	Homogêneo	**	**	-	-

Dsi Densidade do solo inicial; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; ns não significativo

Fonte: os autores

Para essas mesmas classes de solo quando comparadas na camada subsuperficial do LVA, LVd e RQ, estas apresentaram comportamentos diferentes. Para umidades menores do que 25% o LVd é o mais resistente à compactação do que o LVA e RQ, sendo entretanto mais suscetível do que o RQ para umidades maiores que 25% (Figura A2-6). Para umidades menores do que 14% o RQ é mais suscetível do que o LVA. Para umidades entre 14% e 25% o RQ é mais resistente à compactação do que o LVA.

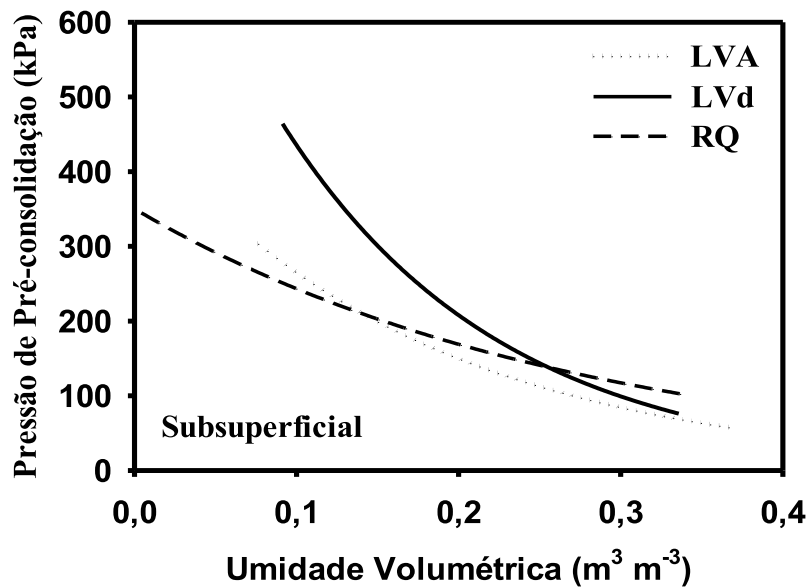


Figura A2-6 Comparação dos Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada subsuperficial do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Neossolo Quartzarênico (RQ)

Fonte: os autores

#### 4 AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARENOSOS

As classes de solo apresentaram umidades variadas durante a execução das operações de colheita florestal e baldeio da madeira (Tabela A2-10) em que a umidade pode interferir na capacidade de suporte de carga do solo. As umidades nas quais as operações de colheita florestal foram realizadas variaram de  $0,13 \pm 0,002$  a  $0,24 \pm 0,01$ .



Tabela A2-10 Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal nas camadas avaliadas das respectivas classes de solo

<b>Classes de Solo</b>	<b>Feller Büncher</b>	<b>Skidder</b>	<b>Garra Traçadora</b>
<b>Superficial</b>			
LVA	0,17±0,01	0,14±0,01	0,24±0,01
LVd	0,21±0,03	0,23±0,03	0,19±0,03
RQ	0,15±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01
<b>Subsuperficial</b>			
LVA	0,21±0,02	0,13±0,002	0,19±0,01
LVd	0,22±0,03	0,22±0,03	0,22±0,03
RQ	0,15±0,01	0,15±0,01	0,14±0,01

<sup>1</sup> Média ± erro padrão. Média de 10 repetições

Fonte: os autores

As operações de colheita florestal estão promovendo compactação adicional nas classes de solos arenosos estudados (Figura A2-7).

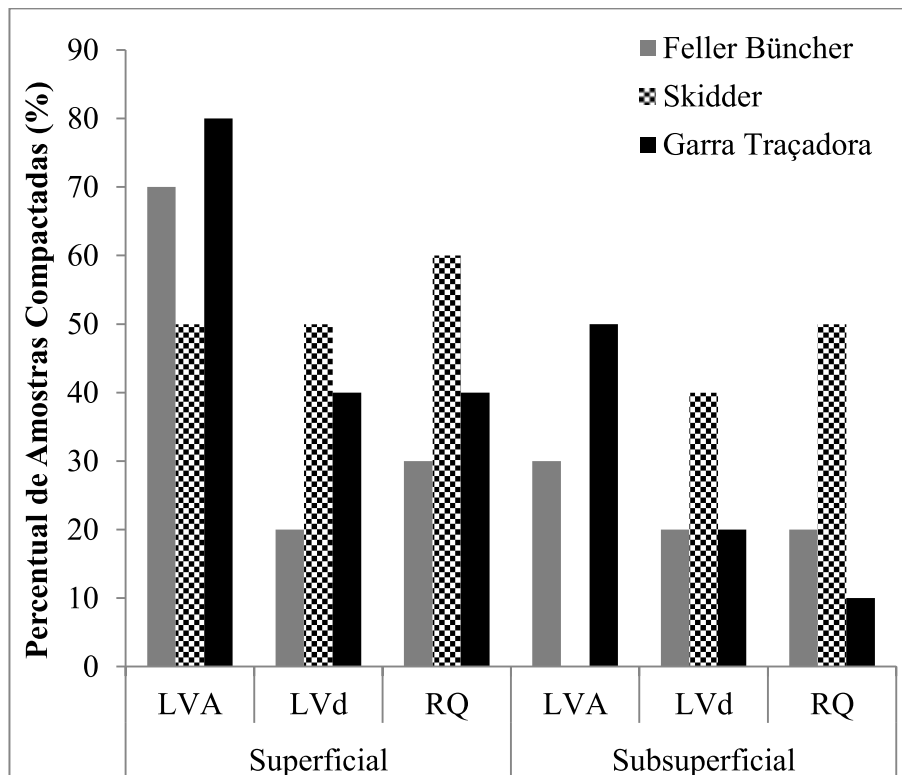


Figura A2-7 Percentual de amostras compactadas nas operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ) na camada superficial e subsuperficial

Fonte: os autores

O LVA apresentou a maior compactação promovida pelas operações de colheita e baldeio da madeira na camada superficial, com 67% das amostras compactadas. Este resultado foi ocasionado pela Garra Traçadora com 80% das amostras compactadas, seguidas pelo Feller Büncher e pelo Skidder, com 70% e 50% das amostras compactadas, respectivamente. Nessa camada superficial o LVd foi a classe de solo que sofreu a menor compactação, com 37% das amostras compactadas. O maior impacto nessa classe de solo para essa camada foi dado pelo Skidder, que compactou 50% das amostras. Notadamente, foi a operação de colheita florestal que apresentou o maior acréscimo na densidade do solo e a maior contribuição para a redução da porosidade total do solo, como descrito na Tabela A2-3.

Em sequência, a maior compactação foi promovida pela Garra Traçadora compactando 40% das amostras e pelo Feller Büncher, com 20% das amostras compactadas. Martins et al. (2013) em avaliação de impacto com a Garra Traçadora na camada superficial de um Latossolo Vermelho, observaram compactação em 80% das amostras. Isto reflete no alto potencial de compactação desse equipamento.

O RQ apresentou compactação intermediária, com 43% das amostras compactadas. Novamente, o maior impacto foi promovido pelo Skidder, com 60% das amostras compactadas, seguidas pela Garra Traçadora e pelo Feller Büncher, com 40% e 30% das amostras compactadas respectivamente. Nessa camada superficial, a Garra Traçadora e o Skidder foram os equipamentos que promoveram a maior compactação do solo, com 53% das amostras compactadas com cada equipamento. O Feller Büncher foi o menos impactante, com 40% das amostras compactadas. Desta forma, o manejo está provocando compactação adicional da estrutura do solo, comprometendo a qualidade física e favorecendo a redução da capacidade produtiva do solo nos próximos ciclos de plantio.

Na camada subsuperficial, o LVA apresentou o menor impacto das operações de colheita florestal, com 20% das amostras compactadas. O Skidder foi o único equipamento que não promoveu compactação nesta classe de solo. O Feller Büncher e a Garra Traçadora promoveram compactação em 30% das amostras cada um.

O Skidder promoveu a maior compactação do solo na camada subsuperficial no LVd, com 40% das amostras compactadas, seguidos pelo Feller Büncher e pela Garra Traçadora, com 20% das amostras compactadas em cada um. Esse percentual de 20% de compactação também foi encontrado por Martins et al. (2013) na avaliação da compactação em LV nas camadas de 0 a 3 cm e de 15 a 18 cm. Em sequência foram o Feller Büncher com 23% das amostras compactadas e a Garra Traçadora com 20% das amostras compactadas.

O LVd e o RQ apresentaram mesmo percentual de compactação, com 27% das amostras compactadas. No RQ, a maior compactação foi promovida pelo Skidder, compactando 50% das amostras seguidos pelo Feller Büncher e pela Garra Traçadora com 20% e 10% das amostras compactadas respectivamente. Na camada subsuperficial, as operações com o Skidder foram as que mais promoveram a compactação do solo com percentual de 30%.

## 5 CONCLUSÕES

Em geral, o LVd é o mais resistente à compactação na camada superficial em umidades menores que  $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

As operações de colheita florestal estão promovendo compactação adicional do solo comprometendo a sustentabilidade estrutural em todas as classes de solo e em todas as camadas avaliadas.

A camada superficial apresenta maior compactação do que a camada subsuperficial.

Na camada superficial, o manejo mais impactante é promovido pela Garra Traçadora e pelo Skidder e na camada subsuperficial o Skidder é o que promove maior compactação do solo.

## REFERÊNCIAS

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 377-382.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3rd. ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. [2015]. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

CUNHA, A. R. et al. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA/UNESP, 1999. v. 1, p. 487-490.

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

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - East Lansing State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

\_\_\_\_\_. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, jun. 1996.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-28.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis., In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 383-411.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, June 2005.

MARTINS, P. C. C. et al. Levels of induced pressure and compaction as caused by forest Harvesting operations. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 83-91, jan./mar. 2013.

PAIS, P. S. M. **Atributos físicos, capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos e manejos**. 2014. 91 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PELLISSARI, A. L. et al. Atributos físicos-hídricos e estoque de carbono em Neossolo Quartzarênico sob plantio de *Eucalyptos urograndis*. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 24-28, out./dez. 2013.

PIRES, B. S. et al. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 635-642, 2012.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

SANTOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SCHAFFER, B. et al. Soil and macro-pores under uniaxial compression: I mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1-2, p. 183-191, July 2008.

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

SIGMA PLOT. **Scientific Graphing Software**: version 8.0. San Rafael: Jandel Corporation, 2006.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 547-554, 2011.

\_\_\_\_\_. Camada de resíduos florestais e pressão de pré-consolidação de dois Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 89-93, jan. 2007.

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**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th. ed. Iowa: University Press Ames, 1989.

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**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 641-648, jul./ago. 2014.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.

**ARTIGO 3 - Comparação entre os solos argilosos e arenosos****IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA  
ESTRUTURA DE SOLOS ARGILOSOS E ARENOSOS  
CULTIVADOS COM EUCALIPTO<sup>1</sup>**

Zélio Resende de Souza<sup>2</sup>, Moacir de Souza Dias Junior<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Parte da dissertação do primeiro autor

<sup>2</sup> Mestrando do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras

**RESUMO**

A sustentabilidade do setor florestal depende especialmente do manejo adotado no solo onde são efetuados os plantios de eucalipto. A intenção maior é de com o manejo adequado, preservar a estrutura do solo de maneira que não promova a compactação do mesmo. Objetivou-se no presente trabalho: a) elaborar os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para solos argilosos e arenosos; b) Avaliar o impacto das operações de colheita florestal na estrutura dessas classes de solos argilosos e arenosos. Os solos argilosos utilizados nesta pesquisa, estão situados no município de Elias Fausto, SP, sendo um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) do município de Botucatu-SP; e os solos arenosos estão localizados no município de Botucatu, SP, sendo um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ) cultivados com eucalipto. Foram coletadas amostras indeformadas utilizando os anéis volumétricos na camada superficial e subsuperficial em todas as classes de solo, em que a camada subsuperficial coincidiu com a camada de maior resistência à penetração determinada previamente no campo, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. A partir dos MCSC, avaliou-se o impacto das operações de colheita florestal realizado com os equipamentos Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nas classes de solo estudadas e nas duas camadas. Os MCSC diferiram estatisticamente indicando que as classes de solo possuem comportamento diferente em relação à compactação. O PVA apresentou o maior impacto e o LVd o menor impacto na estrutura do solo na camada superficial. Na camada subsuperficial, o PVAd e o LVAd apresentaram a maior compactação e no PVA não se verificou compactação. A Garra Traçadora foi o equipamento que promoveu maior compactação do solo nas duas camadas avaliadas.



Palavras-chave: Pressão de pré-consolidação. Compactação do solo. Manejo florestal.

### ABSTRACT

Sustainability of the forestry sector relays on the soil management practices that are carried out on eucalypt plantations. Aiming to ensure soil structure preservation, it is necessary to assess its load bearing capacity and to monitor the impact of forestall machinery. Among the methods to evaluate soil compaction, precompression stress, because of its efficiency, has been widely used to assess soil structural degradation, allowing to determine the soil load bearing capacity as a function of soil water content. This work aimed to obtain the load bearing capacity models (LBCM) for a Red-Yellow Latossolo (LVAd) and a Red-Yellow Argissolo + Neossolo Litólico (PVAd) from Elias Fausto-SP, and a Red-Yellow Argissolo (PVA), a dystrophic Red-Yellow Latossolo (LVd), a Red-Yellow Latossolo (LVA), a dystrophic Red Latossolo (LVd) and a Neossolo Quartzarênico (RQ) from Botucatu-SP. The evaluated layers were at 0-3 cm depth for all the soils, and on the layers at 30-33 cm for the PVA and LVAd, at 27-30 cm for the PVAd, LVA and LVAd4, and at 25-28 cm for the RQ. It was also evaluated the impact of mechanized operations with Feller Buncher, Skidder and Grapple Saw on the same soil classes and layers. The generated LBCM were statistically different between the evaluated soils, and the forestall machinery is causing additional soil compaction. On the 0-3 cm layer, the PVA was the most compacted, while on the depth layer neither of the soils contrasted. Among the equipment, there were differences regarding soil compaction.

Keywords: Precompression stress. Soil compaction. Forest management.

## 1 INTRODUÇÃO

O manejo do solo é de fundamental importância para a preservação da vida dos ecossistemas e acima de tudo, para a produção de bens demandados em qualidade e em escala cada vez maior pela crescente população humana, sendo assim, necessário aumentar a produtividade e com custos cada vez mais reduzidos de maneira a não impactar o meio ambiente. Para que isso ocorra, é necessário conhecer as características intrínsecas das classes de solo em exploração, a fim de manejá-las com o menor impacto possível.

O setor florestal tem grande importância na participação das atividades econômicas do país, sendo responsável pela produção de matéria prima nos vários setores que abastecem os polos econômicos do país. Dada a relevada importância, é necessário manter a sustentabilidade de suas atividades, visto que muitos outros setores de grande importância nacional dependem de matéria prima advindas da área florestal e seus derivados.

Os diferentes usos do solo vêm causando compactação do solo que por sua vez dificulta o desenvolvimento de raízes (GYSI, 2001) devido as alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo (AJAYI et al., 2009; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008; SEVERIANO et al., 2008). A compactação reduz a infiltração da água no perfil do solo, tornando uma agravante aos processos erosivos principalmente em solos descobertos e com características favoráveis ao arraste de partículas do solo. Segundo Ferreira, Fernandes e Curi (1999), os Latossolos cauliniticos apresentam menor permeabilidade e menor estabilidades dos agregados, o que facilita o arraste de partículas do solo pelo escoamento superficial.

Entre as várias etapas do manejo florestal, a colheita é a primeira de uma série de atividades que desempenham intenso tráfego, em que todas as máquinas aplicam uma carga na superfície do solo podendo resultar em um processo de degradação da sua estrutura do solo. Segundo Dias Junior et al. (2005), o tráfego do maquinário florestal durante as operações de colheita e baldeio da madeira, podem causar compactação do solo, acarretando um decréscimo da produtividade ao longo dos ciclos de produção (DIAS JUNIOR et al., 2007), sendo um dos principais fatores responsáveis pela compactação do solo (DEDECEK; GAVA, 2005; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; SILVA et al., 2007).

O uso e o manejo inadequado do solo estão diretamente relacionados com a degradação da estrutura física. O mesmo manejo empregado em uma determinada classe de solo que não promova compactação pode ser danoso à outra classe de solo que possui características diferentes. A compactação tem sido identificada como um dos principais processos causadores da

degradação dos solos (CANILLAS; SALOKHE, 2002; DIAS JUNIOR, 2003; DIAS JUNIOR et al., 2003).

Isto posto, temos que a degradação da estrutura das classes de solo pode ser inferida através da análise de vários atributos denominados indicadores de qualidade das propriedades físicas do solo como a porosidade, permeabilidade, distribuição, tamanho e continuidade dos poros (FERREIRA, 2010), condutividade hidráulica, densidade do solo, resistência mecânica e capacidade de suporte de carga do solo (ABID; LAL, 2008; ARAÚJO JUNIOR et al., 2008; GLAB; KULING, 2008; OLIVEIRA et al., 2003, SEVERIANO et al., 2008; SILVA et al., 2006). A densidade do solo está diretamente relacionada com a disposição das partículas do solo e quando altera esse arranjo, ocorre variação na densidade do solo (FERREIRA, 2010), podendo ser consequência da compactação.

Como a deformação da estrutura do solo é dependente da umidade que o solo se encontra e da pressão aplicada, foi desenvolvido por Dias Junior (1994) um modelo matemático que determina a máxima pressão que o solo é capaz de suportar em função da umidade, chamado de Modelo de Capacidade Suporte de Carga (MCSC). Este modelo relaciona a pressão de pré-consolidação que é a máxima pressão que o solo já sofreu em seu histórico com a umidade do solo (DIAS JUNIOR, 2003). Quanto maior a umidade do solo, menor é a pressão de pré-consolidação. Ao se aplicar uma carga no solo superior à pressão de pré-consolidação, ocorrerá deformações não recuperáveis na estrutura do solo, chamadas de deformações plásticas. Quando se aplica pressões inferiores à pressão de pré-consolidação ocorre deformações elásticas, pequenas e recuperáveis pela classe de solo, sem que ocorra compactação adicional do solo.

Objetivou-se no presente trabalho:

- a) comparar os modelos de capacidade de suporte de carga desenvolvidos para os solos argilosos: Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd); e

para os solos arenosos: Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ) na camada superficial e subsuperficial dos mesmos, sendo a camada subsuperficial a que apresentou maior resistência à penetração da faca em diagnóstico de campo;

- b) comparar os impactos das operações de colheita florestal com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora na estrutura das respectivas classes de solo e nas camadas avaliadas.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi conduzido em áreas comerciais cultivadas com eucalipto da EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA, sendo as áreas dos solos argilosos com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) do município de Elias Fausto, SP e Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) do município de Botucatu, SP e as áreas de solos arenosos também situadas no município de Botucatu com Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ). Os solos da região são formados a partir do derramamento de rochas vulcânicas, pertencentes à mesorregião do Grupo Bauru, com temperatura média anual de 20°C e clima classificado como Cwa de acordo com a classificação internacional de Koppen (CUNHA et al., 1999). Em Elias Fausto, a altitude é de 600 m, com precipitação média anual em torno de 1200 mm, ao passo que Botucatu possui precipitação média anual de 1350 mm e altitude variando de 800 a 840 m (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI, 2015).

Os equipamentos usados na colheita e baldeio do eucalipto foram o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora, os quais possuem as especificações técnicas expostas a seguir.

## 2.1 Feller Büncher

- a) modelo: Feller Büncher 903K, Motor John Deere 6090 H – Tier II 9.0 litros;
- b) potência motor: 300 hp;
- c) torque máximo: 1.270 Nm @ 1.500 rpm;
- d) ventilador do radiador reversível;
- e) força de tração: 331 kn;
- f) torque de giro: 70.503 Nm;
- g) Sistema TMC – CONTROLE TOTAL DA MÁQUINA;
- h) cabine florestal ROPS, FOPS e OPS;
- i) massa ou peso de operação sem cabeçote: 33.345 kg;
- j) massa ou peso operacional: 35.800 kg;
- k) esteiras de garra simples “ou dupla de 24” (610 mm);
- l) material rodante com 09 roletes inferiores e 2 roletes superiores cada lado;
- m) capacidade de levantamento no alcance máximo sem cabeçote: 6.440 kg;
- n) alcance máximo: 8,4 m;
- o) tanque de combustível: 1.117 L;
- p) opcionais incluídos:
  - Sistema Flex-air – ventilador reversível,
  - AFEX – Sistema de Supressão de Incêndio,
  - contador de árvores,
  - cabeçote modelo FR 22B: Giro do Cabeçote de 312°,
  - capacidade de corte: 22 polegadas,
  - massa ou peso do cabeçote: 3.774 kg,
  - área de acúmulo: 0,48 m<sup>2</sup>.

## 2.2 Skidder

- a) modelo: Skidder 848 H Arco Duplo, Marca John Deere;
- b) motor eletrônico John Deere 6068 H com controle de emissões Tier III;
- c) potência máxima de 224 hp;
- d) transmissão direta 6 velocidades a frente e 3 a ré;
- e) velocidade máxima de deslocamento a frente: 20 km/h;
- f) velocidade máxima de deslocamento a ré: 14 km/h;
- g) garra John Deere tipo multi-função Sorting/Bunching área: 1,5 m<sup>2</sup>;
- h) tanque de 329 litros;
- i) pneus dianteiros e traseiros Firestone: 30.5-32;
- j) cabine com vidros de policarbonato FOPS, ROPS, OPS;
- k) cabine com ar condicionado;
- l) massa ou peso operacional: 17.842 kg;
- m) opcionais incluídos:
  - limpador traseiro,
  - paralama traseiro,
  - alternador 120 Amp,
  - luzes de trabalho.

## 2.3 Garra Traçadora

- a) modelo: Escavadeira John Deere 200D LC (Garra Traçadora);
- b) motor John Deere 6068H 6.8 litros;
- c) potência líquida motor: 159 hp @2.150 rpm;
- d) torque máximo: 579 Nm @ 1.300 rpm;
- e) Força de tração: 19.240 kg;
- f) massa ou peso de operação: 20.925 kg;
- g) torque de giro: 58.640 Nm;

- h) sistema hidráulico com 2 bombas hidráulicas com capacidade de 212L cada;
- i) esteiras de 600 mm;
- j) material rodante com 8 roletes inferiores e 2 superiores de cada lado;
- k) alcance máximo: 9,0 m;
- l) Joysticks Suregrip;
- m) proteções florestais:
  - kit de instalação hidráulica,
  - tubulações hidráulicas,
  - proteções inferiores reforçadas,
  - janela dianteira de policarbonato 13 mm,
  - janela lateral direita 6 mm,
  - ponteira para sustentação do cabeçote,
  - faróis de trabalho,
  - ponteira para instalação da garra traçadora.

A amostragem foi realizada em duas etapas sendo a primeira antes das operações de colheita e baldeio da madeira na entrelinha da floresta de eucalipto para a elaboração dos Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) e a segunda etapa, após as operações de colheita florestal e baldeio da madeira na linha do rodado dos respectivos equipamentos carregados com a carga máxima de madeira, em uma única passagem dos equipamentos no solo sem resíduos florestais, a fim de avaliar e comparar o impacto desses equipamentos na estrutura das classes de solos mencionadas.

Em todas as classes de solo foram coletadas amostras na camada superficial, 0 a 3 cm de profundidade. E para a determinação da camada subsuperficial, foi realizada a abertura de trincheiras no perfil das classes de solo e verificou-se no diagnóstico de campo, a camada de maior resistência à penetração da faca. Desta forma, a camada subsuperficial foi identificada como sendo a profundidade de 30 a 33 cm no PVA e LVAd, de 27 a 30 cm no PVAd, LVA e LVd, e de 25 a 28 cm no RQ.

As amostras foram coletadas em anéis cilíndricos com dimensões de 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura aproximadamente com o auxílio do amostrador de Uhland. Para a elaboração dos MCSC foram coletadas 15 amostras em cada camada e em cada classe de solo, resultando em 180 amostras. Para a avaliação dos impactos foram coletadas 10 amostras em cada classe de solo e em cada camada amostrada para cada equipamento avaliado, totalizando 360 amostras para avaliação de impacto. Todas as amostras foram coletadas com estrutura preservada, mantendo sua integridade, as quais após a coleta foram envoltas em um filme plástico e parafinadas, sendo conduzidas posteriormente ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras.

No laboratório, as amostras passaram por um processo de preparação, sendo retirados inicialmente a parafina, o filme plástico e o excesso de solo dos anéis volumétricos, de maneira que o volume de solo a ser avaliado correspondesse ao volume do anel. Com o excesso de solo retirados dos anéis, foram feitas as análises texturais pelo método de Bouyoucos (GEE; BAUDER, 1986) e análise de densidade de partículas pelo método do Balão volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986), cujos resultados encontram-se na Tabela A3-1.



Tabela A3-1 Densidade de partículas ( $D_p$ ) e análise granulométrica das duas camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ)

Classes de Solo	$D_p$ <sup>1</sup>	Argila	Silte	Areia	Classe Textural <sup>2</sup>
	Mg m <sup>-3</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Superficial</b>					
PVA	2,73	460	120	420	Argila
LVAd	2,60	600	170	230	Muito argiloso
PVAd	2,60	680	80	240	Muito argiloso
LVA	2,50	100	0	900	Areia
LVd	2,64	250	20	730	Franco Argilo Arenoso
RQ	2,53	50	40	910	Areia
<b>Subsuperficial</b>					
PVA	2,63	500	200	300	Argila
LVAd	2,60	650	150	200	Muito argiloso
PVAd	2,60	750	140	110	Muito argiloso
LVA	2,44	120	0	880	Areia Franca
LVd	2,70	240	40	720	Franco Argilo Arenoso
RQ	2,60	70	20	910	Areia

<sup>1</sup> Média de três repetições; <sup>2</sup> Segundo Santos et al. (2013)

Fonte: os autores

Para a elaboração dos MCSC as amostras foram saturadas e secas naturalmente até a umidade desejada, sendo então realizado o ensaio de compressão uniaxial. Na avaliação dos impactos, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados nas amostras com a umidade na qual as operações foram realizadas no campo.

No ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram comprimidas utilizando-se consolidômetros da marca Boart Longyear sendo submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, de acordo com a metodologia de Bowles (1986), modificada por Dias Junior (1994). As pressões foram aplicadas nas amostras até que estas apresentaram 90% da sua máxima deformação, conforme descrito por Taylor (1948). A pressão de pré-consolidação foi determinada de acordo com Dias Junior e Pierce

(1995). Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105°C-110°C por 48 horas, determinando a umidade da amostra durante o ensaio. A pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) foi ajustada em função da umidade ( $\theta$ ) pela equação  $\sigma_p = e^{(a + b\theta)}$ , em que “a” e “b” são os parâmetros de ajuste da equação utilizando o *software* Sigma Plot 10.0 (2006) sendo os MCSC comparados conforme procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989).

A avaliação dos impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do PAV, LVAd, PVAd, LVA, LVd e do RQ foram determinadas conforme os critérios descritos por Dias Junior et al. (2007) (Figura A3-1).

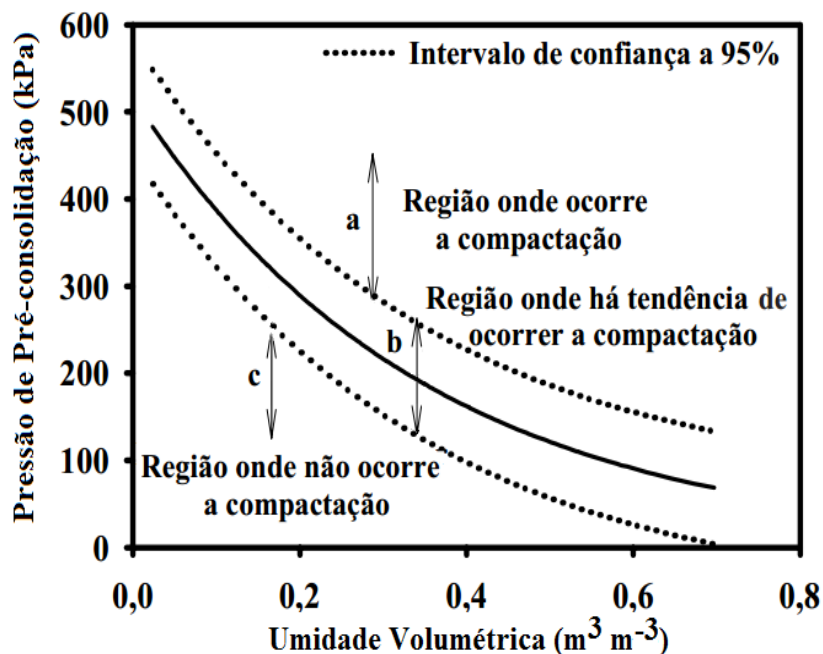


Figura A3-1 Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura do LVA, LVd e RQ

a = região onde já ocorreu compactação do solo; b = região onde não ocorre compactação do solo, mas tende a sofrer compactação nas próximas operações se as pressões aplicadas forem superiores do que as pressões do limite superior do intervalo de confiança; c = região onde não ocorre compactação do solo

Fonte: Dias Junior et al. (2007)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos solos argilosos na camada superficial, as operações de colheita florestal realizadas com o Feller Büncher e com a Garra Traçadora promoveram maior aumento da densidade do solo no LVAd, aumentando em 11% e 16%, respectivamente. Já o Skidder promoveu maior aumento da densidade do solo no PVAd, sendo este aumento de 18% (Figura A3-2). Nessa mesma camada para solos arenosos, o RQ foi a classe de solo que apresentou o maior aumento da densidade do solo promovido pelas operações de colheita florestal realizadas com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora, ocorrendo aumento de 16%, 20% e 24%, respectivamente.

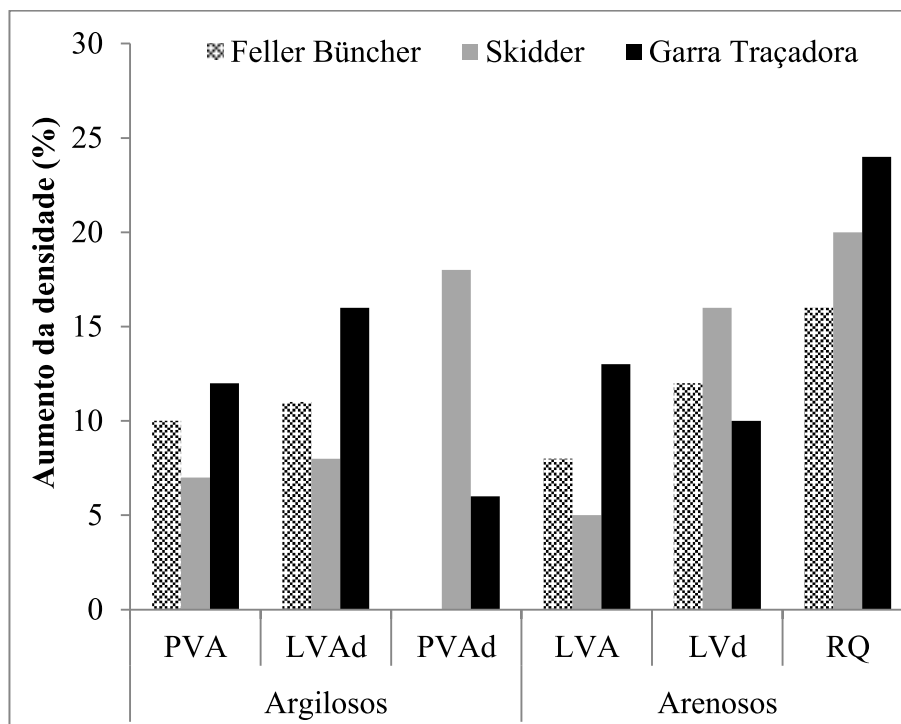


Figura A3-2 Aumento da densidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) na camada superficial sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora

Fonte: os autores

Quanto à porosidade total nos solos argilosos na camada superficial (Figura A3-3), o LVAd apresentou a maior redução, promovida pelo Feller Büncher e Garra Traçadora, com redução de 17% e 24%, respectivamente. O Skidder promoveu a maior redução no PVAd, sendo esta de 28%. Nos solos arenosos, a maior redução da porosidade total ocorreu no RQ, com redução da porosidade total em 24%, 29% e 36% ocasionadas respectivamente pelo Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora.

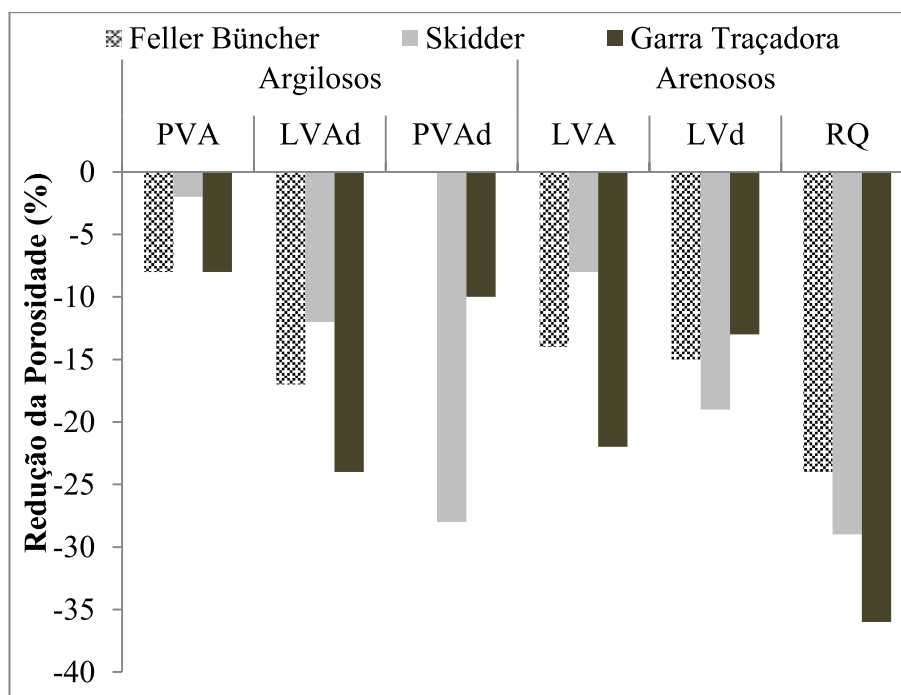


Figura A3-3 Redução da porosidade nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) na camada superficial sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora

Fonte: os autores

Na camada subsuperficial dos solos argilosos (Figura A3-4), o maior aumento da densidade do solo ocorreu no LVAd promovidos pelo Feller Büncher e Skidder, aumentando a densidade do solo em 5% cada um e, pela Garra Traçadora, aumentando a mesma em 10%. O maior aumento da densidade do solo nas classes arenosas promovido pelo Feller Büncher,

ocorreu no LVA e no LVd, aumentando a densidade em 6% cada um. O Skidder promoveu o maior aumento na densidade do solo no RQ, aumentando em 7% e a Garra Traçadora promoveu o maior aumento na densidade do solo no LVA, aumentando em 9%.

Comparando estes resultados, observa-se que em geral os maiores aumentos na densidade do solo ocorreram nos solos arenosos.

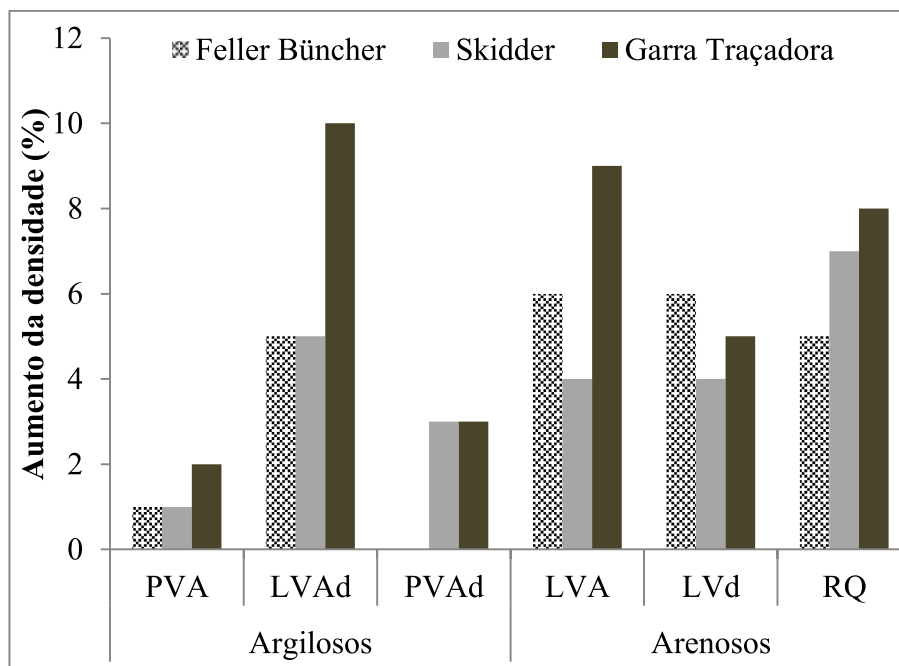


Figura A3-4 Aumento da densidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) nas camadas subsuperficiais sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora

Fonte: os autores

Na camada subsuperficial dos solos argilosos (Figura A3-5), a maior redução da porosidade total ocorreu no LVAd, promovido pela Garra Traçadora, sendo esta de 15%, e pelo Feller Büncher e Skidder, em que cada equipamento reduziu em 7% a porosidade total. Diferentemente, nos solos arenosos, a maior redução da porosidade total, ocorreu no RQ promovida pela Garra traçadora, esta de 14%. O Feller Büncher promoveu a maior

redução da porosidade total, sendo esta de 11% tanto no LVA quanto no LVd, e a maior redução da porosidade total promovida pelo Skidder ocorreu no LVA, correspondendo a 8%.

Analisando estes resultados, observa-se que em geral as maiores reduções da porosidade total ocorreram nos solos arenosos.

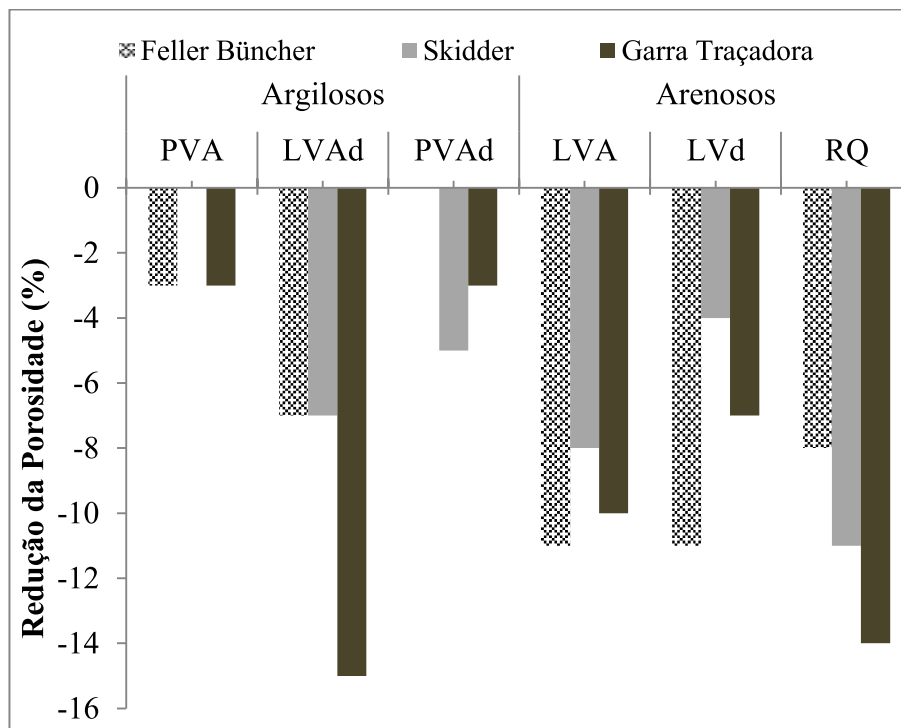


Figura A3-5 Redução da porosidade do solo nas classes de solos Argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e solos arenosos (LVA, LVd e RQ) nas camadas subsuperficiais sob o impacto das operações com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora

Fonte: os autores

Os modelos de capacidade de suporte de carga foram homogêneos (Tabela A3-2) e estatisticamente diferentes, mostrando que as classes de solos apresentam comportamentos distintos.

Tabela A3-2 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares generalizados na camada superficial e subsuperficial do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ)

Classes de Solo	F	Coefficiente linear "a"	Coefficiente angular "b"
<b>Superficial</b>			
PVA 0-3 x RQ 0-3	Homogêneo	ns	**
PVA 0-3 x LVA 0-3	Homogêneo	**	ns
RQ 0-3 x LVA 0-3	Homogêneo	ns	**
PVA 0-3 x LVAd 0-3	Homogêneo	ns	**
RQ 0-3 x LVAd 0-3	Homogêneo	**	**
LVA 0-3 x LVAd 0-3	Homogêneo	ns	**
PVAd 0-3 x LVd 0-3	Homogêneo	ns	ns
PVA 0-3 x PVAd e LVd 0-3	Homogêneo	**	**
RQ 0-3 x PVAd e LVd 0-3	Homogêneo	**	ns
LVA 0-3 x PVAd e LVd 0-3	Homogêneo	**	**
LVAd x PVAd e LVd 0-3	Homogêneo	**	**
<b>Subsuperficial</b>			
PVA 30-33 x RQ 25-28	Homogêneo	**	ns
PVA 30-33 x LVA 27-30	Homogêneo	**	*
RQ 25-28 x LVA 27-30	Homogêneo	ns	*
PVA 30-33 x LVAd 30-33	Homogêneo	ns	**
RQ 25-28 x LVAd 30-33	Homogêneo	**	**
LVA 27-30 x LVAd 30-33	Homogêneo	**	ns
PVAd 27-30 x LVd 30-33	Homogêneo	ns	ns
PVA 30-33 x PVAd 27-30 e LVd 30-33	Homogêneo	ns	**
RQ 25-28 x PVAd 27-30 e LVd 30-33	Homogêneo	**	**
LVA 27-30 x PVAd 27-30 e LVd 30-33	Homogêneo	**	ns
LVAd 30-33 x PVAd 27-30 e LVd 30-33	Homogêneo	**	ns

\* = significativo a 5%; \* \* = significativo a 1%, ns = não significativo

Fonte: os autores

A Figura A3-6 apresenta os modelos de capacidade de suporte de carga para a camada superficial do PVA, LVAd, PVAd, LVA, LVd e RQ. Os modelos de capacidade de suporte de carga da camada superficial do PVA e do LVd não diferiram estatisticamente e desse modo um novo

modelo foi elaborado ajustando todos os valores de pressões de pré-consolidação e umidades volumétricas (Figura A3-6).

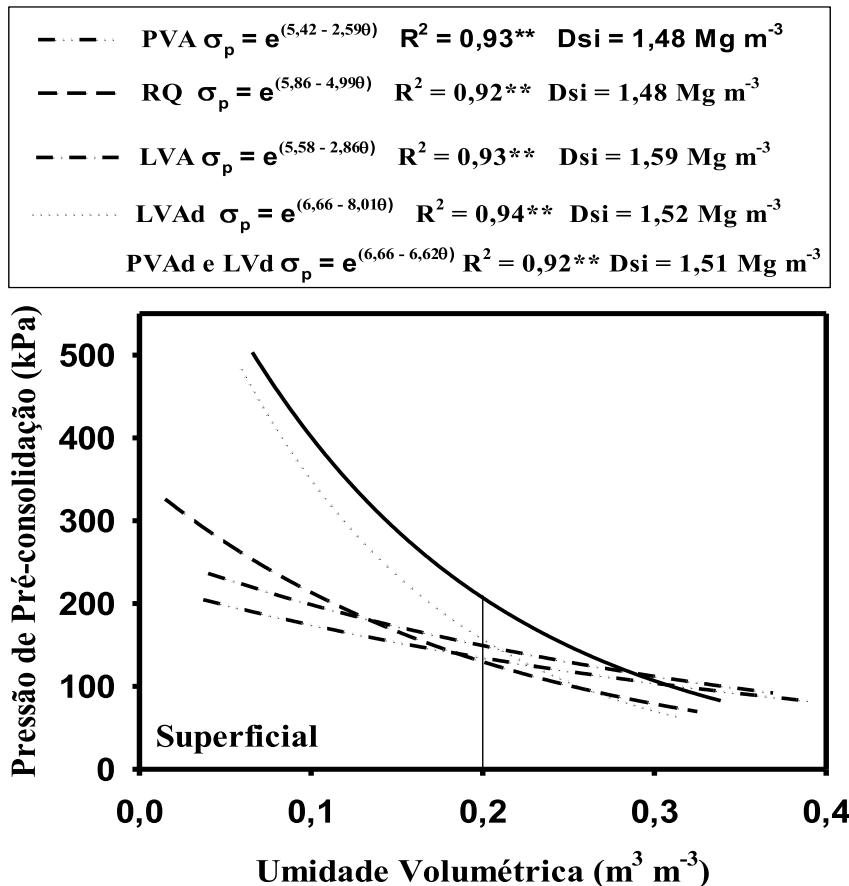


Figura A3-6 Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada superficial dos solos argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e para os solos arenosos (LVA, LVd e RQ)

Fonte: os autores

O PVAd e o LVd foram as classes de solo que apresentaram maior capacidade de suporte de carga na camada superficial sendo, portanto, as mais resistentes à compactação.

Em seguida, inferimos que o LVAd foi a classe de solo que apresentou a segunda maior capacidade de suporte de carga e segunda maior resistência à compactação na camada superficial para umidades volumétricas



menores do que  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  sendo, entretanto um dos mais suscetíveis à compactação para umidades maiores do  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  devido à sua menor capacidade de suporte de carga.

De um modo geral na camada superficial, para umidades menores do que  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  as classes de solos mais resistentes à compactação foram: PVAd, LVd e o LVAd e a mais suscetível à compactação foi o PVA.

Em geral, para umidades maiores do que  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  as classes de solos mais resistentes à compactação na camada superficial foram o PVAd e o LVd e as mais suscetíveis à compactação foram o LVAd e o RQ.

A Figura A3-7 apresenta os modelos de capacidade de suporte de carga para a camada subsuperficial. Os modelos de capacidade de suporte de carga da camada subsuperficial do PVA e do LVd não diferiram estatisticamente e desse modo um novo modelo foi elaborado ajustando todos os valores de pressões de pré-consolidação e umidades volumétricas (Figura A3-7).

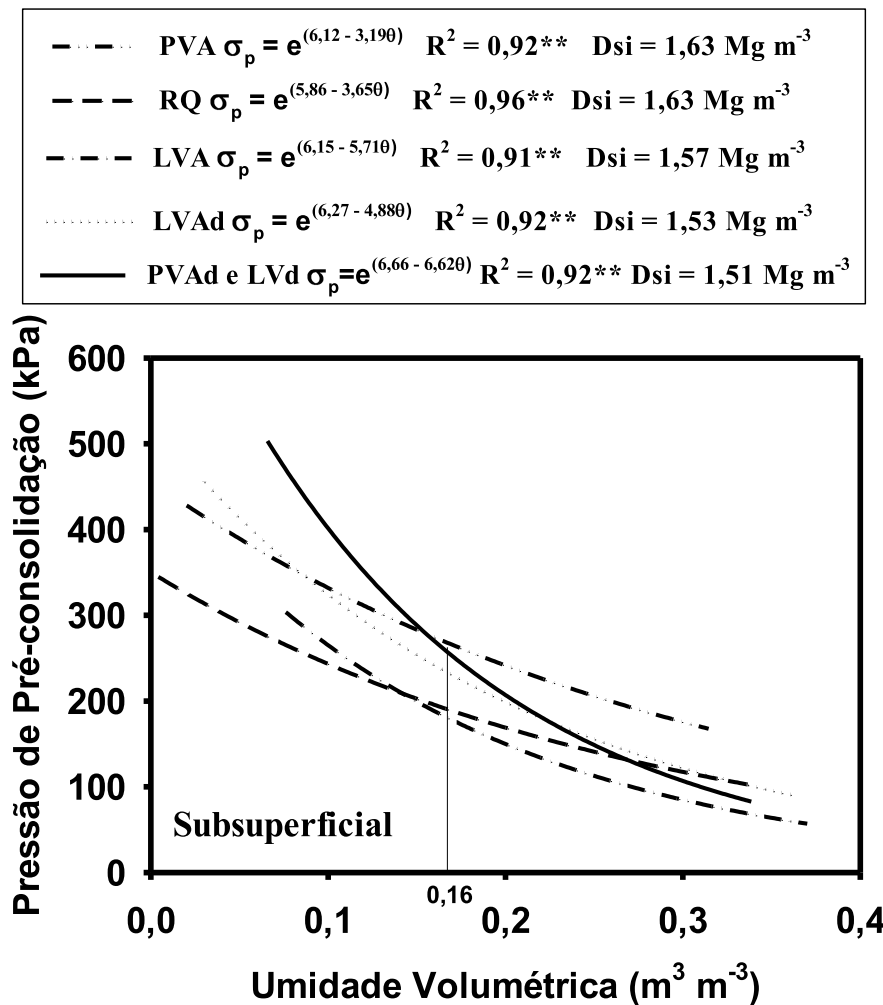


Figura A3-7 Modelos de capacidade de suporte de carga para a camada subsuperficial dos solos argilosos (PVA, LVAd e PVAd) e dos solos arenosos (LVA, LVd e RQ)

Fonte: os autores

Para umidades menores que  $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a camada subsuperficial do PVAd e do LVd foram as mais resistentes à compactação e a do LVA e RQ foram as mais suscetíveis à compactação. Já a camada subsuperficial do LVAd e do PVA apresentaram comportamento intermediário.

Usualmente, para umidades maiores que  $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a camada subsuperficial do PVA foi a mais resistente à compactação e a do RQ e LVA foram as mais suscetíveis à compactação. No que se refere a camada

subsuperficial do PVAd, do LVd e LVAd, estas apresentaram comportamento intermediário.

#### 4 AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS ARGILOSOS E ARENOSOS

A umidade durante as operações de colheita e baldeio das árvores (Tabela A3-3) variaram em função das classes de solo avaliadas, a qual exerce grande influência na capacidade suporte de carga do solo sendo um fator determinante no impacto dos equipamentos florestais em suas atividades. As umidades nas quais as operações de colheita florestal foram realizadas variaram de  $0,08 \pm 0,01$  à  $0,24 \pm 0,01$ .

Tabela A3-3 Umidade de operação dos equipamentos de colheita florestal das classes de solo nas camadas avaliadas

Classes de Solo	Feller Büncher	Skidder	Garra Traçadora
<b>Superficial</b>			
PVA	$0,12 \pm 0,09^1$	$0,12 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$
LVAd	$0,17 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,02$
PVAd	$0,21 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
LVA	$0,17 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,01$
LVd	$0,21 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,03$
RQ	$0,15 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$
<b>Subsuperficial</b>			
PVA	$0,15 \pm 0,02$	$0,09 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$
LVAd	$0,14 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$
PVAd	$0,13 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
LVA	$0,21 \pm 0,02$	$0,13 \pm 0,002$	$0,19 \pm 0,01$
LVd	$0,22 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,03$
RQ	$0,15 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$

<sup>1</sup> Média  $\pm$  erro padrão. Média de 10 repetições  
Fonte: os autores

As operações de colheita e baldeio da madeira promoveram compactação do solo na camada superficial e subsuperficial, sendo esta a camada de maior resistência à penetração no diagnóstico de campo (Tabela A3-4).

Nos solos argilosos para a camada superficial, a maior compactação ocorreu no PVA, em que o Feller Büncher promoveu 90% de compactação, seguidos pelos Skidder e pela Garra Traçadora compactando 80% das amostras cada um.

Nos solos arenosos nessa mesma camada, a maior compactação promovida pelo Feller Büncher e pela Garra Traçadora ocorreu no LVA, sendo 70% e 80% das amostras compactadas respectivamente. O Skidder promoveu a maior compactação no RQ sendo 60% das amostras compactadas. Estes resultados demonstram que a maior compactação ocorreu no PVA.

Na camada subsuperficial dos solos argilosos, a maior compactação promovida pelo Feller Büncher ocorreu no LVAd, com 40% das amostras compactadas. O Skidder promoveu a maior compactação no PVAd sendo 30% das amostras compactadas e a Garra Traçadora, promoveu a maior compactação no PVAd e no LVAd, compactando 30% das amostras em cada um.

Nos solos arenosos na camada subsuperficial, a maior compactação promovida pelo Feller Büncher e pela Garra Traçadora ocorreram no LVA, compactando 30% das amostras cada equipamento, ao passo que o Skidder promoveu a maior compactação no RQ, em 50% das amostras. Contrapondo estes resultados, observa-se que a maior compactação adicional do solo ocorreu no RQ.

Tabela A3-4 Porcentagem de amostras compactadas nos solos argilosos (PVA, LVAd e no PVAd) e nos solos arenosos (LVA, LVd e RQ) com o Feller Büncher, Skidder e Garra Traçadora nas duas camadas

<b>Classes de Solo</b>	<b>Feller Büncher</b>	<b>Skidder</b>	<b>Garra Traçadora</b>	<b>Compactação Média</b>
<b>Superficial</b>				
PVA	90%	80%	80%	83%
LVAd	30%	50%	60%	47%
PVAd	20%	50%	50%	40%
LVA	70%	50%	80%	67%
LVd	20%	50%	40%	37%
RQ	30%	60%	40%	43%
<b>Subsuperficial</b>				
PVA	0%	0%	0%	0%
LVAd	40%	20%	30%	30%
PVAd	30%	30%	30%	30%
LVA	30%	0%	30%	20%
LVd	20%	40%	20%	27%
RQ	20%	50%	10%	27%

Média de 10 repetições

Fonte: os autores

## 5 CONCLUSÕES

Em geral, para umidades inferiores a 20% na camada superficial o PVAd e o LVd são as classes de solo mais resistentes à compactação enquanto o PVA é menos resistente à compactação. As demais classes de solo apresentam comportamento intermediário.

Na camada superficial, o maior aumento da densidade do solo e a redução da porosidade total ocorreram no RQ. Na camada subsuperficial, o maior aumento da densidade do solo e a maior redução da porosidade total ocorreu no LVAd.

As operações de colheita e baldeio da madeira estão promovendo a compactação adicional da estrutura do PVA, LVAd, PVAd, LVA, LVd e

RQ, sendo a maior compactação ocorrida no PVA na camada superficial e no RQ na camada subsuperficial.

Os solos argilosos e arenosos apresentam comportamentos distintos quanto à sua susceptibilidade à compactação.

A Garra Traçadora promoveu a maior compactação do solo.

## REFERÊNCIAS

ABID, M.; LAL, R. Tillage and drainage impact on soil quality I: aggregate stability, carbon and nitrogen pools. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 100, n. 1-2, p. 89-98, Aug. 2008.

AJAYI, A. E. et al. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan. 2009.

ARAÚJO JUNIOR, C. F. et al. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejos de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 377-382.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3rd. ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS  
APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos municípios**

**paulistas**. [2015]. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

CUNHA, A. R. et al. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA/UNESP, 1999. v. 1, p. 487-490.

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

DIAS JUNIOR, M. S. A soil mechanics approach study soil compaction In: ACHYUTHAN, H. **Soil and soil physics in continental environment**. Chennai: Allied Publishers Private, 2003. p. 179-199.

\_\_\_\_\_. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - East Lansing State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, 2003.

\_\_\_\_\_. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

\_\_\_\_\_. Traffic effects on the preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, May/June 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, jun. 1996.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-28.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 515-524, 1999.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis., In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 383-411.

GLAB, T.; KULIG, B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 169-178, June 2008.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 133-142, Sept. 2001.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

SANTOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SEVERIANO, E. C. et al. Pressão de pré-consolidação e intervalo hídrico ótimo com indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4 p. 1419-1427, jul./ago. 2008.



SIGMA PLOT. **Scientific Graphing Software**: version 8.0. San Rafael: Jandel Corporation, 2006.

SILVA, S. R. et al. Alterações do solo influenciadas pelo trafego e carga de um Forwarder nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 842-847, out./dez. 2006.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th. ed. Iowa: University Press Ames, 1989.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.