



PAULA CRISTINA CARUANA MARTINS

**CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE
DIFERENTES CLASSES DE SOLOS
SUBMETIDAS A DIFERENTES USOS**

**LAVRAS – MG
2012**

PAULA CRISTINA CARUANA MARTINS

**CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE DIFERENTES CLASSES
DE SOLOS SUBMETIDAS A DIFERENTES USOS**

Tese 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 a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Moacir de Souza Dias Junior

**LAVRAS – MG
2012**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Martins, Paula Cristina Caruana.

Capacidade de suporte de carga de diferentes classes de solos submetidas a diferentes usos / Paula Cristina Caruana Martins. – Lavras : UFLA, 2012.

100 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Bibliografia.

1. Modelos de capacidade de suporte de carga. 2. Pressão de pré-consolidação. 3. Café. 4. Eucalipto. 5. Física do solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.43

PAULA CRISTINA CARUANA MARTINS

**CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE DIFERENTES CLASSES
DE SOLOS SUBMETIDAS A DIFERENTES USOS**

Tese 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 a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2012.

Dr. Ayodele Ebenezer Ajayi	FUTA
Dr. Elifas Nunes de Alcântara	EPAMIG
Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG

Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Orientador

**LAVRAS - MG
2012**

À minha filha, Isabella Cristina Caruana
Martins de Souza Dias que me ensina
diariamente o significado do amor e me
dá forças para vencer as dificuldades
cotidianas.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Edna Caruana e Marcos Augusto Martins, ao meu irmão querido, Fernando César Caruana Martins, a minha avó Celeste Caruana, pelo amor, dedicação, generosidade e exemplos de vida.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de crescimento profissional e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior, pela valiosa orientação, ensinamentos, dedicação, paciência e incentivo.

Ao Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Dr. Elifas Nunes de Alcântara, professor Dr. Mozart Martins Ferreira e ao Professor Dr. Ayodele Ebenezer Ajayi, pela disponibilidade dispensada em participar da banca examinadora e pelas sugestões e críticas dadas.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários Dulce Claret Monteiro Moraes e Dorotheo de Abreu, pela amizade e grande ajuda na realização deste trabalho, e aos colegas Maria Luiza de Carvalho Andrade, Paula Sant'ana Moreira Paes, Adriana Cristina Dias, Piero Iori, Bruno Silva Pires, do laboratório de Física do Solo.

Às queridas amigas Anna Hoffman, Amanda e Ariane Nascimento, Mariane Hamaue e a Daniela Aparecida Andrade sempre presentes, por me apoiarem e por tornarem estes anos muito melhores de serem vividos.

RESUMO

A principal causa de degradação da estrutura do solo é o tráfego das máquinas utilizadas pelas operações mecanizadas que podem promover compactação afetando o desenvolvimento das culturas. Esta tese contém três estudos cujos objetivos foram: Estudo 1: determinar os impactos das operações da colheita florestal mecanizada na estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com eucalipto situado em Curvelo, MG usando os modelos de capacidade de suporte de carga e a pressão de pré-consolidação. Estudo 2: determinar a suscetibilidade à compactação de algumas classes de solo com diferentes texturas situadas em Capão Bonito, SP e em Três lagoas, MS. Estudo 3: gerar os modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho-Amarelo localizado na Fazenda Experimental da EPAMIG, Três Pontas, MG, e determinar a suscetibilidade à compactação em função do tempo de implantação da lavoura cafeeira bem como os impactos causados pelo tráfego das operações mecanizadas na estrutura do solo. No primeiro estudo, as avaliações envolveram quantificações dos impactos das operações de corte e processamento da madeira, após estas operações. No segundo estudo, as avaliações envolveram quantificações dos impactos das operações de corte das árvores e baldeio da madeira, realizadas em dois módulos florestais. No terceiro estudo, as avaliações envolveram quantificações dos impactos das operações mecanizadas em lavouras cafeeiras com diferentes idades de implantação. No estudo 1, a Garra Traçadora foi identificada como sendo o equipamento que promoveu maior degradação, a maior compactação foi obtida para intensidade de tráfego igual a 7 passadas nas duas profundidades. No estudo 2, observou-se que as classes de solo de Três Lagoas, MS foram mais suscetíveis à compactação do que as de Capão Bonito, SP. O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga determinados, permitiram identificar o número de passadas do Harvester superior a duas; do Forwarder superior a seis; do Feller Buncher igual a uma e do Clambunk igual a duas como os números de passadas que promoveram maior degradação da estrutura do solo. No estudo 3, o uso dos modelos de capacidade de suporte de carga identificaram os cafeeiros com os tempos de implantação 7, 18 e 33 anos como os mais suscetíveis à compactação. O cultivo com 2 anos de implantação foi o mais resistente à compactação. A compactação na linha de tráfego situada na parte inferior da entrelinha considerando, o declive, foi igual ou maior do que a compactação na linha de tráfego situada na parte superior da entrelinha.

Palavras-Chave: Pressão de pré-consolidação. Compactação do solo. Eucalipto. Café.

ABSTRACT

The main source soil structure degradation is the machinery traffic used in forest harvesting operations, because these operations may cause soil compaction, with consequent effect the crop development. This thesis contains three studies whose objectives were: Study 1: determine the impacts of the mechanized forest harvesting operations on the Red Latosol structure cultivated with eucalyptus located in Curvelo - MG , using load-bearing capacity models and the precompression stress. Study 2: determine the susceptibility to compaction of some soil class with different textures located in Capão Bonito, SP and in Três Lagoas, MS. Study 3: Generate load-bearing capacity models for an Oxisol located in the EPAMIG - Experimental Farm, at Três Pontas - MG, and determine the susceptibility to compaction as a coffee crop management over time as well the impacts caused through traffic of mechanized operations in the soil structure. In the first study, the evaluations involved measurements in cutting and bucking of timber, after these operations. In the second study, the assessments involved quantifications the impacts of cutting tree operations and wood transport, conducted in two modules forest. In the third study, the assessments involved quantifications the impacts of the mechanized operations in coffee plantations with different ages of establishment. In study 1, the Garra Traçadora was identified as the equipment promoted further degradation; the greater compaction was obtained for the traffic intensity equal 7 passes at two depths. In study 2, it was observed that the soil classes of Três Lagoas - MS were more susceptible to compaction than Capão Bonito - SP. The use of load-bearing capacity models determined, allowed to identify the passes number of the Harvester over two, the Forwarder over six; the Feller Buncher equal to one and the Clambunk equal to two as the passes number that have promoted greater degradation of the soil structure. In study 3, the use of load-bearing capacity models identified coffee trees with the time of implementation 7, 18 and 33 years as the most susceptible to compaction. Farming with two years of implementation was the most resistant to compression. The compaction in traffic line located at the bottom of interrow, considering the slope, was equal or greater than the compaction in the traffic line on the top of the interrow.

Keywords: Precompression stress. Soil Compaction. Eucalyptus. Coffee.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Modelo de capacidade de suporte de carga do LV cultivado com eucalipto para as profundidades 0-3 e 15-18 cm com os critérios usados para analisar o efeito das operações mecanizadas na pressão de pré-consolidação do Latossolo Vermelho. a) Região onde ocorre compactação adicional; b) região onde não ocorre compactação, mas com tendência de ocorrer compactação; e c) região onde não ocorre compactação..... 43

CAPÍTULO 3

- Figura 1 Modelos de capacidade de suporte de carga das Unidades de Capão Bonito, SP e de Três Lagoas, MS para a camada de 0-3 cm..... 68
- Figura 2 Modelos de capacidade de suporte de carga das Unidades de Capão Bonito, SP e de Três Lagoas, MS para a camada de 10-13 cm..... 69

CAPÍTULO 4

- Figure 1a Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 2 years of establishments..... 90

Figure 1b	Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 7 years of establishments.....	91
Figure 1c	Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 18 years of establishments.....	91
Figure 1d	Final load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 18 years of establishments.....	92
Figure 1e	Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 33 years of establishments.....	92
Figure 1f	Final load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 33 years of establishments.....	93
Figure 2	Load-bearing capacity models at 0-3 cm layer of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with different time of establishments.	94
Figure 3	Load-bearing capacity models at 15-18 cm layer of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with different time of establishments.	95

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1	Análises de caracterização física e classes texturais do Latossolo Vermelho (LV)	39
Tabela 2	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para as profundidades de 0-3 e 15-18 cm do LV	43
Tabela 3	Porcentagem de amostras compactadas de acordo com os critérios explanados na Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa)	44
Tabela 4	Porcentagem de amostras compactadas de acordo com a Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa).....	45
Tabela 5	Porcentagem de amostras compactadas de acordo com a Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa).....	47

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Número de amostras indeformadas coletadas por camada nas classes de solo de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS para determinar o efeito do tráfego da colheita florestal sobre a compactação do solo nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm	62
Tabela 2	Resultados das análises de caracterização física e classes texturais determinadas de acordo com Gee & Bauder (1986) para as classes de solo de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS.....	63

Tabela 3	Valores das densidades do solo iniciais das amostras indeformadas coletadas antes das operações de colheita florestal nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm.....	64
Tabela 4	Coefficientes lineares (a) e angulares (b) dos modelos de capacidade de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] para as classes de solos de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS	65
Tabela 5	Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).....	66
Tabela 6	Porcentagem de amostras compactadas de acordo com Dias Junior et al. (2005), para um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2).....	70
Tabela 7	Porcentagem de amostras compactadas, de acordo com os critérios propostos por DIAS JUNIOR et al. (2005), para um Argissolo Vermelho distrófico, latossólico (PVd)	71
Tabela 8	Porcentagem de amostras compactadas, de acordo com os critérios propostos por DIAS JUNIOR et al. (2005), para um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1), Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) e Latossolo Vermelho distrófico espessarênico (LVd4).....	72

CAPÍTULO 4

Table 1	Comparison of load-bearing capacity models for the coffee culture with different establishment times in a Red-Yellow Latosol according to the procedure described in Snedecor & Cochran (1989).....	88
---------	---	----

Table 2	Comparison of the load-bearing capacity models for the coffee culture with different establishment times in a Red-Yellow Latosol according to the procedure described in Snedecor & Cochran (1989).....	89
Table 3	Percentage of compacted soil samples caused by mechanized operations on a Red-Yellow Latosol in the 0-3 and 15-18 cm layers according to the criteria proposed by Dias Junior et al. (2005).....	96

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 Introdução geral e referencial teórico	17
1	INTRODUÇÃO GERAL	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Compactação do solo	19
2.2	A cultura do eucalipto no Brasil	21
2.3	A cultura do cafeeiro no Brasil	24
	REFERÊNCIAS	26
	CAPÍTULO 2 Impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura de um latossolo cultivado com eucalipto.....	34
1	INTRODUÇÃO	36
2	MATERIAL E MÉTODOS	38
2.1	Amostras coletadas antes do corte das árvores de eucalipto	39
2.2	Amostras coletadas após o corte das árvores de eucalipto	40
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48
	CAPÍTULO 3 Impacto das operações de colheita florestal na compactação de algumas classes de solos cultivadas com eucalipto.....	52
1	INTRODUÇÃO	54
2	MATERIAL E MÉTODOS	57
2.1	Amostras coletadas antes do corte das árvores de eucalipto	58
2.2	Amostras coletadas após o corte e baldeio das árvores de eucalipto	60
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4	CONCLUSÕES	73

	REFERÊNCIAS	74
	CAPÍTULO 4 Compaction caused by mechanized operations in a red-yellow latosol cultivated with coffee over time.....	81
1	INTRODUCTION	83
2	MATERIALS AND METHODS.....	84
3	RESULTS AND DISCUSSION.....	87
4	CONCLUSIONS.....	96
	REFERENCES	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL E REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO GERAL

A história do setor florestal brasileiro está associada à época do descobrimento do País marcado pela grande importância socioeconômica (ALTOÉ, 2008) e por uma atividade extrativista sem preocupação de sustentabilidade ambiental (BELMONTE, 2005).

Na sua história mais recente, observa-se que até a década de 60, o setor florestal era pouco expressivo na economia brasileira e caracterizando-se por ser uma exploração predatória dos recursos florestais (VALVERDE, 1995). A partir de 1966, devido a um conjunto de políticas de incentivos fiscais, o setor florestal brasileiro experimentou um crescimento bastante significativo, o que propiciou a especialização da mão de obra e o desenvolvimento de novas tecnologias (BELMONTE, 2005). Entre as novas tecnologias usadas no setor florestal, citam-se o uso de motosserras, tratores agrícolas com guincho (MALINOVSKI; CAMARGO; MALINOVSKI, 2002). Entretanto, somente a partir das décadas de 80 (MALINOVSKI; CAMARGO; MALINOVSKI, 2002) e de 90 (ALTOÉ, 2008; FERNANDES; SOUZA, 2003) que a colheita florestal passou a ser tecnologicamente avançada, devido à importação de maquinários da Europa e dos Estados Unidos, como; os *Feller Bunchers*, os *Harvesters*, os *Skidders*, etc. (ALTOÉ, 2008; MALINOVSKI; CAMARGO; MALINOVSKI, 2002).

Desta maneira, as operações mecanizadas de colheita florestal intensificaram-se no início da década de 90, promovendo em consequência uma degradação acelerada do solo, devido ao aumento do tráfego de máquinas (FERNANDES; SOUZA, 2003; LOPES et al., 2006), o qual é realizado muitas vezes em condições inadequadas de umidade ou com o solo com baixa capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR et al., 2005), causando

degradação de sua estrutura com conseqüente compactação e prejudicando as produções desses solos ao longo do tempo (DIAS JUNIOR et al., 2007).

O grande desafio dos estudos sobre sustentabilidade é em relação ao desenvolvimento de metodologias para avaliação da qualidade do solo e do ambiente sob interferência do homem (MENDES; MELLONI; MELLONI, 2006). Assim sendo, associado ao desenvolvimento tecnológico da colheita florestal mecanizada e ao seu potencial em promover compactação do solo, pesquisadores têm utilizado diversas propriedades físicas e mecânicas para quantificar o efeito da compactação sobre a estrutura do solo. Entre essas propriedades citam-se: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR et al., 2007; DIAS JUNIOR et al., 2008; LOPES et al., 2006; MARTINS; SILVA; FERREIRA, 2002; MENDES; MELLONI; MELLONI, 2006; SILVA; BARROS; COSTA, 2006) e mais recentemente a pressão de pré-consolidação (AJAYI et al., 2009; DIAS JUNIOR et al., 2002, 2008). Apesar dessas propriedades serem capazes de identificar a compactação do solo, nenhuma delas, exceto a pressão de pré-consolidação, possui a capacidade de estimar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar que a compactação adicional ocorra.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Compactação do solo

Uma das limitações para que o desenvolvimento sustentável seja alcançado está relacionada com a resistência mecânica do solo, que pode ser natural ou devido ao manejo inadequado.

Diferentes manejos têm alterado as propriedades físicas do solo (AJAYI et al., 2009; DIAS JUNIOR et al., 2007; SILVA; BARROS; COSTA, 2006), causando compactação e restringindo a penetração do sistema radicular devido à pressão de turgor insuficiente para vencer a resistência mecânica do solo (GYSI, 2001).

A compactação do solo promove aumento da densidade do solo e da sua resistência mecânica (AJAYI et al., 2010); reduz a porosidade total alterando a distribuição de poros por tamanho (AJAYI et al., 2009; HILLEL, 1982) promove aumento da capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR et al., 2007, SILVA; DIAS JUNIOR; LEITE, 2007, 2008) limitando a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, a troca gasosa, a emergência das plântulas e o desenvolvimento do sistema radicular (ARVIDSSON, 2001; BICKI; SIEMENS, 1991; DÜRR; AUBERTOT, 2000; GYSI, 2001; TARDIEU, 1988) resultando em decréscimo da produção (ARVIDSSON, 2001; DAUDA; SAMARI, 2002; RADFORD et al., 2001), aumentando a erosão e a potência dos equipamentos usados no preparo do solo (CANILLAS; SALOKHE, 2002; STONE, 1987).

As curvas de compressão obtidas nos ensaios de compressão uniaxial são frequentemente usadas em estudos de compactação do solo (AJAYI et al., 2009, 2010). Essas curvas descrevem a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (CASAGRANDE, 1936;

HOLTZ; KOVACS, 1981). A pressão de pré-consolidação divide a curva de compressão do solo em uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária) e a região de deformações plásticas e não recuperáveis (curva de compressão virgem) (HOLTZ; KOVACS, 1981). Assim, a pressão de pré-consolidação é um indicador da máxima pressão já aplicada ao solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; HOLTZ; KOVACS, 1981) e também um indicador da resistência do solo (ARVIDSSON, 2001). Assim, na agricultura deve-se evitar a aplicação de pressões maiores do que a pressão de pré-consolidação para evitar que a compactação ocorra (DEFOSSEZ; RICHARD, 2002; GUPTA; HADAS; SCHAFER, 1989).

A pressão de pré-consolidação depende de vários fatores como: variação da pressão devido à erosão e escavações, ciclos de secagem e umedecimento, textura, estrutura e densidade do solo, manejo do solo, matéria orgânica, mineralogia, etc. (BRUMUND; JONAS; LADD, 1976; CASAGRANDE, 1936; CRAWFORD, 1964; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; HOLTZ; KOVACS, 1981; MCBRIDE; JOOSSE, 1996).

Métodos para estimar a pressão de pré-consolidação estão disponíveis na literatura (ANDERSON; LUKAS, 1981; BURMISTER, 1951; CASAGRANDE, 1936; CULLEY; LARSON, 1987; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; MCBRIDE; JOOSSE, 1996) sendo utilizados frequentemente nas ciências agrárias.

Entretanto, há ainda uma carência de estudos usando os modelos de capacidade de suporte de carga e a pressão de pré-consolidação determinada após as operações mecanizadas para quantificar os danos causados por essas operações na estrutura dos solos cultivados principalmente com eucalipto e café.

2.2 A cultura do eucalipto no Brasil

O Brasil é o quinto país exportador de celulose do mundo e apesar de ocupar o décimo quinto lugar nas exportações de papel e papelão apresentou, no período de 1997 a 2006, o maior crescimento efetivo no valor dessas exportações (CARVALHO et al., 2010). O crescimento das exportações está associado à produtividade das florestas plantadas, devido ao clima e solos favoráveis, com elevada extensão de terras apropriadas ao desenvolvimento do eucalipto, bem como a utilização de tecnologia silvicultural avançada e ao rápido crescimento da área de plantações florestais (CARVALHO et al., 2010; SOUZA et al., 2010). Além disso, observa-se que o período de maior crescimento efetivo no valor das exportações coincide com a adoção da colheita florestal, tecnologicamente avançada (FERNANDES; SOUZA, 2003; LOPES et al., 2006), devido à importação de maquinários (MACHADO; LOPES, 2000; MINETTE et al., 2008) o que resultou em um maior rendimento das operações de colheita florestal.

Devido às importações desses equipamentos, as operações mecanizadas de colheita florestal intensificaram-se no início da década de 90 promovendo como consequência a degradação física acelerada do solo, devido ao aumento do tráfego de máquinas (FERNANDES; SOUZA, 2003; LOPES et al., 2006) e prejudicando as produções desses solos ao longo do tempo (DIAS JUNIOR et al., 2007). Em vista disso, o desenvolvimento florestal sustentável está relacionado às operações mecanizadas de colheita florestal (DIAS JUNIOR et al., 2007). Portanto, a principal fonte de degradação da estrutura do solo é o tráfego das máquinas utilizadas na colheita florestal. O número de passadas das máquinas (AMPOORTER et al., 2007, 2010; DEBIASE et al., 2008; LOPES et al., 2006; SILVA; DIAS JUNIOR; LEITE, 2007) de colheita e baldeio da madeira é uma informação importante para que o desenvolvimento florestal

sustentável seja atingido (DIAS JUNIOR et al., 2002), pois essas operações podem causar compactação do solo afetando o desenvolvimento da floresta (DIAS JUNIOR et al., 2008).

A compactação do solo provoca diminuição do crescimento das árvores devido à redução na permeabilidade do solo à água, ao espaço reduzido para o desenvolvimento das raízes, pobre aeração e aumento da resistência do solo à penetração (GRIGAL, 2000), que podem limitar o crescimento e penetração das raízes (AMPOORTER et al., 2010; JORDAN; PONDER; HUBBARD, 2003; RÖMKENS; MILLER, 1971). Apesar de Römken e Miller (1971) terem sugerido que a pressão que o sistema radicular deve aplicar ao solo para desenvolver seja maior do que a pressão de pré-consolidação, esses autores não especificaram os valores de umidades que podem ser restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular. Considerando que a pressão de pré-consolidação depende da umidade (AJAYI et al., 2009; ARAUJO JUNIOR et al., 2011a; FIGUEIREDO et al., 2011; JULIÃO et al., 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011; SEVERIANO et al., 2010a, 2010b) passa ser importante, portanto, considerar em estudos do ambiente físico do solo às raízes, os modelos de capacidade de suporte de carga, pois estes permitem estimar as pressões de pré-consolidação em função da umidade do solo.

A compactação do solo pode ser avaliada utilizando várias propriedades do solo, como: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica (AMPOORTER et al., 2010; DEBIASE et al., 2008; DIAS JUNIOR et al., 2008; LOPES et al., 2006; MARTINS; SILVA; FERREIRA, 2002; MENDES; MELLONI; MELLONI, 2006; SILVA; BARROS; COSTA, 2006) e, atualmente, a pressão de pré-consolidação (AJAYI et al., 2009, 2010; ARAUJO JUNIOR et al., 2011a; DIAS JUNIOR et al., 2008; FIGUEIREDO et al., 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011; SEVERIANO et al., 2010a, 2010b). Nesses estudos a pressão de pré-consolidação foi considerada

como: (1) um indicador da resistência mecânica do solo (HORN; FLEIGE, 2003); (2) a máxima pressão que deve ser aplicada ao solo para evitar que a compactação ocorra (AJAYI et al., 2009; ARAUJO JUNIOR et al., 2011a; SEVERIANO et al., 2010a, 2010b); e (3) a pressão que o sistema radicular deve aplicar ao solo para permitir o alongamento (RÖMKENS; MILLER, 1971).

O uso da pressão de pré-consolidação, como um indicador da sustentabilidade da estrutura do solo sob o ponto de vista mecânico, baseia-se no fato de que esta divide a curva de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações elásticas e recuperáveis (região onde não ocorre compactação adicional do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis (região onde ocorre compactação adicional do solo) (HOLTZ; KOVACS, 1981). Assim, a maior pressão que deve ser aplicada aos solos para evitar a sua compactação adicional é a pressão de pré-consolidação (ARAUJO JUNIOR et al., 2011a; KELLER et al., 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011).

Para minimizar o risco de ocorrer compactação adicional do solo, o tráfego das operações de colheita florestal deve ser feito considerando a pressão de pré-consolidação que é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo (DEBIASE et al., 2008; DIAS JUNIOR et al., 2005; PACHECO; CANTALICE, 2011). Além disso, a determinação das variações na pressão de pré-consolidação do solo, em função do conteúdo de água, pode ajudar a planejar o tráfego de máquinas visando evitar que a compactação adicional do solo ocorra (ARAUJO JUNIOR et al., 2011a; PACHECO; CANTALICE, 2011; SEVERIANO et al., 2010a).

2.3 A cultura do cafeeiro no Brasil

O café foi introduzido no Brasil em 1727 e ao longo de sua história apresentou ciclos de expansão e crises de acordo com as variações da economia mundial (ORMOND; PAULA; FAVERET FILHO, 1999). Entretanto, devido à adaptação das plantas às condições de solo e clima e também pelo aumento da área plantada (INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC, 2011), hoje o Brasil é o primeiro produtor e o segundo consumidor mundial do produto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ - ABIC, 2010). Atualmente, a produção nacional corresponde a 39,6% da produção mundial, podendo atingir na safra 2010 uma produção de 39 milhões de sacas de 60 kg (ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA –AGRIANUAL, 2011), sendo os principais estados produtores Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná e Bahia (SANTOS et al., 2010).

Entre as tecnologias utilizadas para promover o desenvolvimento da cultura do cafeeiro cita-se a mecanização (SANTOS et al., 2010), porém, o uso intensivo da mecanização em solos cultivados com cafeeiros tem alterado a estrutura dos solos, promovendo compactação (ARAUJO JUNIOR et al., 2011a, 2010b; GONTIJO et al., 2008; SANTOS et al., 2009, 2010) e comprometendo o crescimento e a longevidade dos cafezais (ARAUJO JUNIOR et al., 2011b), tornando as plantas mais suscetíveis aos veranicos, por alterar o fluxo de água, promovendo inadequada aeração e deficiência nutricional e elevada resistência mecânica do solo que podem limitar o crescimento do sistema radicular (ARAUJO JUNIOR, 2011a, 2011b).

A compactação do solo pode ser avaliada usando várias propriedades do solo, como: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) e, a partir de 1999 (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999) a pressão de pré-consolidação começou a ser

usada para avaliar a compactação do solo. Atualmente, o uso da pressão de pré-consolidação para avaliar a compactação do solo está bem documentado na literatura (AJAYI et al., 2009; ARAUJO JUNIOR et al., 2011a, 2011b).

REFERÊNCIAS

- 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, Apr. 2010.
- AJAYI, A. E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009.
- ALTOÉ, F. E. **História e evolução da colheita florestal no Brasil**. 2008. 51 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- AMPOORTER, E. et al. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 10, p. 1664-1676, Oct. 2010.
- 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.
- ANDERSON, T. C.; LUKAS, R. G. Preconsolidation pressure predicted using S_u/p' ratio. In: SYMPOSIUM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1., 1981, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: [s. n.], 1981. p. 502-515. (Special Technical Publication, 740).
- ANUÁRIO da Agricultura Brasileira. **Mercados e perspectivas do café**. São Paulo: FNP, 2011. p. 192-210.
- 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, MG, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011a.
- ARAÚJO JUNIOR, C. F. et al. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 499-513, jul./set. 2011b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da indústria de café no Brasil – 2009**. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 16 out. 2010.

BELMONTE, G. Z. **Banco de dados sobre legislação, normas e especificações técnicas pertinentes às máquinas utilizadas na colheita florestal**. 2005. 60 p. Monografia (Especialização “Latu Sensu”) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

BICKI, T. J.; SIEMENS, J. C. Crop response to wheel traffic soil compaction. In: TRANSACTIONS OF THE AMERICA SOCIETY AGRICULTURAL ENGINEERING, 34., 1991, St. Joseph. **Transactions...** St. Joseph: [s. n.], 1991. p. 909-913.

BURMISTER, D. The application of controlled test methods in consolidation testing. In: ANNUAL MEETING OF THE SYMPOSIUM ON CONSOLIDATION TESTING OF SOILS, 54., Atlantic. **Transactions...** Atlantic: [s. n.], 1951. p. 83-98.

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.

CARVALHO, K. H. A. et al. Desempenho das exportações brasileiras de papel. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 263-271, jun. 2010.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University, 1936. p. 60-64.

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 3, p. 562-567, July 1987.

CRAWFORD, C. B. Interpretation of the consolidation tests. In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING, 3., 1964, Evanston. **Proceedings...**Evanston: [s. n.], 1964. p. 93-108.

DAUDA, A.; SAMARI, A. Cowpea yield response to soil compaction under tractor on a sandy loam soil in the semi-arid region of northern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 17-22, Oct. 2002.

DEBIASE, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2629-2637, out./dez. 2008. Número especial.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 41-64. Aug. 2002.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2245-2253, Nov./Dec. 2008.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, jan./jun. 2002.

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

DIAS JUNIOR, M. S. et al. 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. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, 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**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

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

FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. Compactação de um latossolo vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 279-284, jun. 2003.

FIGUEIREDO, G. C. et al. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 389-402, mar./abr. 2011.

GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

GRIGAL, D. F. Effects of extensive forest management on soil productivity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n. 1-3, p. 167-185, Nov. 2000.

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. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic, 1982. 364 p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 89-99, Oct. 2003.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Histórico**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/UniPesquisa/Cafe/Historico.asp>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

JORDAN, D.; PONDER, F. J.; HUBBARD, V.C. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 33-41, May 2003.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, n. 1/2, p. 13-23, June 2011.

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, MG, v. 23, n. 3, p. 497-506, jul./set. 1999.

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

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 124-1129, jul./dez. 2000.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 145-164.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, jan./jun. 2002.

MCBRIDE, R. A.; JOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soils: pedotranfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 373-380, 1996.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estado da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, jul./set. 2006.

MINETTE, L. J. et al. Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada em Niquelândia, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 659-665, nov./dez. 2008.

ORMOND, J. G. P.; PAULA, S. R. L.; FAVERET FILHO, P. F. **Café: (Re)conquista dos mercados**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 1999. 56 p.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 403-415, mar./abr. 2011.

RADFORD, B. J. et al. Crop response to applied soil compaction and to compaction repair treatment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 155-170, Sept. 2001.

RÖMKENS, M. J. M.; MILLER, R. D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 35, n. 2, p. 237-248, Oct. 1971.

SANTOS, G. A et al. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras, na cultura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 123-136, maio/ago. 2010.

SANTOS, G. A et al. Weed management and its influence on the load bearing capacity of Red-Yellow Latosol under the crown projection in coffee culture. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 2, p. 165-177, July/Dec. 2009.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 404-413, maio/jun. 2010a.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 414-423, maio/jun. 2010b.

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, S. R.; BARROS, N.; 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.

SOUZA, E. P et al. Desempenho do setor florestal para a economia brasileira: uma abordagem da matriz insumo-produto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 6, p. 1129-1138, dez. 2010.

TARDIEU, F. Analysis of the spatial variability of maize root density: I. Effect of wheels compaction on the spatial arrangement of roots. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 107, n. 2, p. 259-26, 1988.

VALVERDE, S. R. **Análise técnica e econômica do sistema de colheita de árvores inteiras em povoamentos de eucalipto**. 1995. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

CAPÍTULO 2

**IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL
SOBRE A ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO CULTIVADO
COM EUCALIPTO**

Normas da Revista Cerne

RESUMO

Associado ao desenvolvimento tecnológico da colheita florestal mecanizada e ao seu potencial em promover compactação, pesquisadores têm utilizado diversas propriedades físicas e mecânicas para quantificar a compactação do solo. O objetivo deste estudo foi o de determinar os impactos das operações da colheita florestal mecanizada na estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com eucalipto usando os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) e a pressão de pré-consolidação (σ_p). Este estudo foi realizado com amostras indeformadas coletadas a 0-3 e 15-18 cm de profundidade. Estas amostras foram empregadas no ensaio de compressão uniaxial. A amostragem consistiu-se de duas fases, antes e depois das operações de colheita. As avaliações envolveram quantificações dos impactos das operações da Garra Traçadora, *Harvester*, *Feller Buncher* e na linha de tráfego do *Skidder* através das σ_p determinadas após estas operações. As σ_p também foram determinadas após 1, 3, 5 e 7 passadas do *Forwarder*, Autocarregável, Caminhão normal e Caminhão de pneus largos carregados para as condições de resíduos casca e galho (colheita com o *Harvester*) e galho (colheita com o *Feller Buncher*). A Garra Traçadora foi identificada como o equipamento que promoveu maior degradação da estrutura do solo e independente do equipamento de corte das árvores e do equipamento de baldeio, a maior compactação foi obtida para o número de passadas igual a 7 nas duas profundidades.

Palavras-chave: Pressão de pré-consolidação. Compactação. Operações de colheita.

Impacts of forest harvesting operations on the structure of a Latosol cultivated with eucalyptus

ABSTRACT

Associated to technological development of mechanized forest harvesting operations and its potential to promote compaction; researchers have used various mechanical and physical properties to assess the soil compaction. The objective of this study was to determine the impacts of mechanized forest harvesting operations on the Red Latosol structure cultivated with eucalyptus using load-bearing capacity models (LBCM) and the precompression stress (σ_p). This study was conducted using undisturbed samples collected at 0-3 and 15-18 cm depth. These samples were used in uniaxial compression test. Two phases were constituted the samples, before and after the mechanized harvesting operations. The assessments involved quantifications of the operations impacts from Mechanical Saw, Harvester, Feller Buncher and Skidder on the traffic line through the σ_p determined after these operations. The σ_p were also measured after 1, 3, 5 and 7 Forwarder passes, Self-loading, normal Truck and Truck with wide tires fully loaded for waste conditions, bark and branch (harvest with Harvester) and branch (harvest with Feller Buncher). The Mechanical Saw was identified as the equipment that promoted higher soil structure degradation and independent cutting trees equipment and wood transport, the most compaction was obtained for the passes number equal to 7 at both depths.

Keywords: Precompression stress. Compaction. Harvesting operations.

1 INTRODUÇÃO

A história do setor florestal brasileiro está associada à época do descobrimento do País, marcada por grande importância socioeconômica (ALTOÉ, 2008) e por uma atividade extrativista e sem preocupações com a sustentabilidade ambiental (BELMONTE, 2005).

Na década de 60, o setor florestal apresentava pequena expressão na economia brasileira pela sua característica de exploração predatória dos recursos florestais (VALVERDE, 1995). Devido às políticas de incentivos fiscais a partir de 1966, o setor florestal brasileiro experimentou um crescimento significativo propiciando a especialização da mão de obra e o desenvolvimento de novas tecnologias (BELMONTE, 2005), dentre as quais citam-se: o uso de motosserras, tratores agrícolas com guincho (MALINOVSKI et al., 2002). A partir das décadas de 80 (MALINOVSKI et al., 2002) e de 90 (ALTOÉ, 2008; FERNANDES; SOUZA, 2003) a colheita florestal passou a ser tecnologicamente avançada em virtude da importação de máquinas da Europa e Estados Unidos da América, como os *Feller Bunchers*, os *Harvesters*, os *Skidders*, etc (ALTOÉ, 2008; MALINOVSKI et al., 2002).

Dessa forma, as operações mecanizadas de colheita florestal intensificaram-se no início da década de 90 promovendo uma degradação acelerada do solo, pelo aumento do tráfego de máquinas (FERNANDES; SOUZA, 2003; LOPES et al., 2006) que é realizado muitas vezes em condições inadequadas de umidade ou com o solo com baixa capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR et al., 2005) levando à degradação da estrutura com consequente compactação e prejudicando as produções desses solos ao longo do tempo (DIAS JUNIOR et al., 2007).

O grande desafio dos estudos sobre sustentabilidade é em relação ao desenvolvimento de metodologias para avaliar a qualidade do solo e do

ambiente sob interferência do homem (MENDES et al., 2006). Assim, associado ao desenvolvimento tecnológico da colheita florestal mecanizada e ao seu potencial em promover compactação do solo, pesquisadores têm utilizado diversas propriedades físicas e mecânicas para quantificar o efeito da compactação sobre a estrutura do solo. Dentre essas propriedades citam-se: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR et al., 2007, 2008; LOPES et al., 2006; MARTINS et al., 2002; MENDES et al., 2006; SILVA et al. 2006) e mais recentemente a pressão de pré-consolidação (AJAYI et al., 2009; DIAS JUNIOR et al., 2002, 2008). Apesar destas propriedades serem capazes de identificar a compactação do solo nenhuma delas, exceto a pressão de pré-consolidação, possui a capacidade de estimar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar que a sua compactação adicional ocorra.

Considerando o desafio em desenvolver metodologias para avaliar a qualidade do solo, este estudo tem como objetivo determinar os impactos das operações da colheita florestal mecanizada na estrutura de um Latossolo Vermelho (LV) cultivado com eucalipto usando os modelos de capacidade de suporte de carga e a pressão de pré-consolidação (σ_p).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em áreas de operações florestais de colheita em povoamentos de eucaliptos localizado na Fazenda Buenos Aires, Curvelo, MG, pertencentes a Plantar S.A, com latitude 18° 45' e longitude 44° 25', altitudes variando entre 540 e 1.021m e precipitação média anual de 1.119 mm. O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho (LV), textura muito argilosa.

Os equipamentos usados na colheita florestal foram os seguintes: *Harvester* (21.618 kg), *Feller Buncher* (27.000 kg), Garra Traçadora (13.140 kg), *Forwarder* (19.255 kg), Autocarregável (17.410 kg), Caminhão normal (9.890 kg) e Caminhão de pneu largo (22.370 kg). Este estudo foi feito para avaliar uma condição operacional da Plantar S.A, ou seja, os equipamentos foram comparados nas condições em que a empresa opera por isso as diferenças de carga de trabalho de cada equipamento.

Os resultados das análises de caracterização física e as classes texturais do Latossolo Vermelho (LV) estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 Análises de caracterização física e classes texturais do Latossolo Vermelho (LV)

Prof. cm	D_{si}^1 Mg m ⁻³	D_p^2 Mg m ⁻³	Argila	Silte	Areia	Classe Textural
			----- g kg ⁻¹ -----			
0 – 3	0,90 ³	2,47 ⁴	750 ⁴	30 ⁴	220 ⁴	Muito Argiloso
15 – 18	1,02	2,56	800	50	150	Muito Argiloso

1 = Densidade do solo inicial (antes do tráfego), 2 = Densidade de partículas, 3 = média de 30 repetições; 4 = média de 3 repetições.

A amostragem foi efetuada em duas etapas: antes e após as operações de colheita nas seguintes profundidades: 0-3 e 15-18 cm devido ser esta, a última profundidade de maior resistência à penetração.

2.1 Amostras coletadas antes do corte das árvores de eucalipto

Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga, que é a relação entre a pressão de pré-consolidação e a umidade, 30 amostras indeformadas de 6,4 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura foram coletadas aleatoriamente nas profundidades 0-3 e 15-18 cm, totalizando 60 amostras indeformadas. Coletaram-se, estas amostras em 2008, em um Latossolo Vermelho, textura muito argilosa.

As amostras indeformadas foram inicialmente saturadas em uma bandeja com água até 2/3 da altura da amostra, por 24 horas, e secas ao ar, no laboratório, até a umidade volumétrica se encontrar na faixa de 0,45 m³ m⁻³ a 0,04, sendo então usadas no ensaio de compressão uniaxial (BOWLES, 1986).

Na realização dos ensaios de compressão uniaxial, as amostras indeformadas foram mantidas dentro dos cilindros de alumínio, que foram colocados dentro da célula de compressão sendo submetidos às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa.

Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima era alcançada, e em seguida a pressão foi aumentada para o nível seguinte (TAYLOR, 1948). A partir das curvas de compressão do solo, determinou-se as pressões de pré-consolidação (σ_p) em função da umidade volumétrica (θ) (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995). Em seguida, realizou-se as análises de regressão utilizando o *software Sigma Plot* (Jandel Scientific, PO Box 7005, San Rafael, CA, USA), obtendo-se assim, os modelos de capacidade de suporte de carga. A comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga foi feita através do procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

2.2 Amostras coletadas após o corte das árvores de eucalipto

Para determinar o efeito das operações de colheita, na estrutura do LV, 30 amostras indeformadas [1 classe de solo (LV) x 2 profundidades (0-3 e 15-18 cm) x 3 equipamentos (*Harvester*, *Feller Buncher* e Garra Traçadora) x 5 amostras indeformadas] similares àquelas descritas anteriormente, foram coletadas nos lugares onde o *Harvester*, *Feller Buncher*, e Garra Traçadora ficaram estacionados durante as operações de corte e traçamento das árvores de eucalipto.

Na determinação do efeito da frequência do tráfego, devido às operações de baldeio da madeira na estrutura do LV, amostras indeformadas de solo similares àquelas descritas, anteriormente, foram coletadas aleatoriamente ao longo das linhas de tráfego do *Forwarder*, Autocarregável, Caminhão normal e Caminhão de pneus largos como a seguir: 1 classe de solo (LV) x 2 profundidades (0-3 e 15-18 cm) x 2 equipamentos de abate das árvores (*Harvester* e *Feller Buncher*) x 4 equipamentos (*Forwarder*, Autocarregável, Caminhão normal e Caminhão de pneus largos) x 4 frequências de tráfego (1, 3, 5 e 7 passadas) x 5 amostras indeformadas, totalizando 320 amostras indeformadas. Cada passada representa uma ida e uma volta do equipamento de baldeio carregado ao longo de uma entrelinha.

Submeteu-se estas amostras indeformadas ao ensaio de compressão uniaxial, conforme mencionado anteriormente, com a umidades nas quais as operações de colheita foram realizadas. Após a realização deste ensaio, as σ_p obtidas das amostras, foram representadas nos modelos de capacidade de suporte de carga desenvolvidos neste estudo e através dos critérios propostos por Dias Junior et al. (2005) (Figura 1) determinou-se a porcentagem de amostras que sofreram compactação.

A parte de descarte das amostras indeformadas, oriundas das partes superiores e inferiores dos anéis de amostragem, foram utilizadas nas seguintes análises de caracterização: análise granulométrica (GEE; BAUDER, 1986), densidade de partículas (BLAKE; HARTGE, 1986b), e umidade gravimétrica pelo método da estufa. A umidade volumétrica foi obtida multiplicando a umidade gravimétrica pela densidade do solo. A densidade do solo foi determinada de acordo com Blake e Hartge (1986a) usando amostras indeformadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de capacidade de suporte de carga do Latossolo Vermelho são do mesmo tipo [$\sigma_p = 10^{(a + b \theta)}$] dos obtidos por Dias Junior e Pierce (1996), com R^2 significativo a 1%. Os valores dos coeficientes lineares (“a”) foram iguais a 2,77 e 2,76 para a profundidade de 0-3 cm e 15-18 cm, respectivamente e os valores dos coeficientes angulares (“b”) foram iguais a 1,36 e 1,39 para a profundidade de 0-3 cm e 15-18 cm, respectivamente.

O teste de homogeneidade dessas equações (SNEDECOR; COCHRAN, 1989) indicou que os modelos de capacidade de suporte de carga para as duas profundidades não foram estatisticamente diferentes (Tabela 2) denotando uma mesma capacidade de suporte de carga independente da profundidade. Assim, uma nova equação foi ajustada para (θ, σ_p) , obtendo-se um único modelo de capacidade de suporte de carga para as profundidades 0-3 e 15-18 cm (Figura 1), o qual foi utilizado para avaliar o efeito do tráfego sobre a pressão de pré-consolidação usando os critérios demonstrados na (Figura 1).

Tabela 2 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989) para as profundidades de 0-3 e 15-18 cm do LV

Classe de solo	Profundidade cm	F	Coefficiente linear "a"	Coefficiente angular "b"
LV	0-3 x 15-18	Homogêneo	ns	ns

ns = não significativo

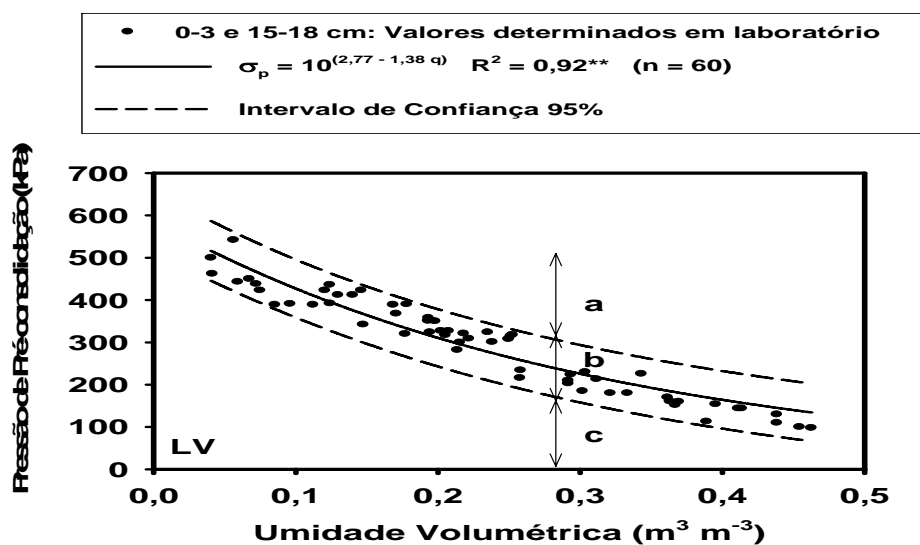


Figura 1 Modelo de capacidade de suporte de carga do LV cultivado com eucalipto para as profundidades 0-3 e 15-18 cm com os critérios usados para analisar o efeito das operações mecanizadas na pressão de pré-consolidação do Latossolo Vermelho. a) Região onde ocorre compactação adicional; b) Região onde não ocorre compactação, mas com tendência de ocorrer compactação; e c) Região onde não ocorre compactação.

Na profundidade 0-3 cm, a Garra Traçadora foi o equipamento que causou maior compactação (Tabela 3), indicando uma maior degradação da estrutura do solo nas áreas de processamento da madeira. Esses resultados estão de acordo com Dias Junior et al. (2005) que encontraram maior degradação da estrutura do solo nas áreas de processamento da madeira. Em segundo lugar, o

equipamento que causou maior compactação foi o Feller Buncher. Já na profundidade 15-18 cm, observa-se que todos os equipamentos tiveram o mesmo comportamento (Tabela 3). A Garra Traçadora foi identificada como o equipamento que promove maior degradação da estrutura do solo e, portanto, sugere-se que sua operação seja realizada fora do talhão devido à compactação induzida ao solo por esta operação.

Tabela 3 Porcentagem de amostras compactadas de acordo com os critérios explanados na Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa)

Profundidade (cm)	Equipamentos de colheita florestal		
	Harvester	Feller Buncher	Garra Traçadora
	Porcentagem de amostras compactadas		
0-3	0	20	80
15-18	20	20	20

A maior porcentagem de amostras de solo compactadas independente do equipamento de abate das árvores e do equipamento de baldeio foi obtida para o número de passadas igual a 7 nas duas profundidades (Tabelas 4 e 5). Esse resultado concorda com outros estudos (DIAS JUNIOR et al., 2008; LOPES et al., 2006; SEIXAS et al., 2003; SILVA et al., 2007), que reportaram grande degradação da estrutura do solo com o aumento do número de passadas das máquinas florestais.

Tabela 4 Porcentagem de amostras compactadas de acordo com a Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa)

Equipamento de baldeio	Porcentagem de amostras compactadas			
	-----Número de passadas-----			
	1	3	5	7
	Resíduo Casca e Galho			
			0-3 cm	
<i>Forwarder</i>	40	40	40	60
			15-18 cm	
	20	20	20	0
			0-3 cm	
Autocarregável	20	0	0	100
			15-18 cm	
	20	20	20	20
			0-3 cm	
Caminhão Normal	0	40	20	60
			15-18 cm	
	0	20	0	20
			0-3 cm	
Caminhão de Pneus Largos	40	60	80	60
			15-18 cm	
	20	20	40	60

Considerando a média das duas profundidades, na condição de resíduos casca e galho (Tabela 4), os equipamentos de baldeio que causaram maior compactação foram em ordem decrescente: Caminhão de pneus largos (22.370 kg); *Forwarder* (19.255 kg), Autocarregável (17.410 kg) e Caminhão normal (9.890 kg). Para essa condição observa-se que à medida que a carga aumentou, a capacidade em promover compactação dos equipamentos de baldeio também aumentou, corroborando com os resultados obtidos por Silva (2006). Esse resultado pode estar associado à distribuição uniforme da galhada e casca obtida no abate das árvores pelo *Harvester*, promovendo uma melhor e eficiente distribuição das pressões aplicadas pelos equipamentos de baldeio.

Considerando a média de cada profundidade e para a condição do abate das árvores realizado como *Feller Buncher* (resíduo galho) na profundidade 0-3

cm (Tabela 5), os equipamentos de baldeio que causaram maior compactação foram em ordem decrescente: *Forwarder*; Caminhão normal igual ao Caminhão de pneus largos e Autocarregável. Já na profundidade 15-18 cm (Quadro 4), os equipamentos de baldeio que causaram maior compactação foram em ordem decrescente: Caminhão normal, *Forwarder*; Caminhão pneus largos e Autocarregável.

Considerando a média das duas profundidades, na condição de resíduo galho (Tabela 5), os equipamentos de baldeio que causaram maior compactação foram em ordem decrescente *Forwarder* (19.255 kg), Caminhão normal (9.890 kg), Caminhão de pneus largos (22.370 kg) e Autocarregável (17.410 kg). O *Forwarder*, nesse caso, foi identificado como sendo o equipamento de baldeio que causou maior compactação concordando com Silva et al. (2007), que observou maior compactação do solo causada pelo *Forwarder* à medida que a intensidade de tráfego aumentou. Este resultado pode estar associado à distribuição aleatória (desuniforme) da galhada promovida pelas operações de abate das árvores realizadas com o *Feller Buncher* não permitindo uma eficiente distribuição das pressões aplicadas ao solo.

Tabela 5 Porcentagem de amostras compactadas de acordo com a Figura 1 para um Latossolo Vermelho (estação chuvosa)

Equipamento de baldeio	Porcentagem de amostras compactadas			
	-----Número de passadas-----			
	1	3	5	7
	Resíduo Galho			
	0-3 cm			
<i>Forwarder</i>	60	20	60	80
	15-18 cm			
	20	0	20	40
	0-3 cm			
Autocarregável	0	0	20	60
	15-18 cm			
	0	0	20	0
	0-3 cm			
Caminhão Normal	0	20	60	60
	15-18 cm			
	0	20	40	60
	0-3 cm			
Caminhão de Pneus Largos	0	40	20	80
	15-18 cm			
	20	0	0	20

A redução nos valores da porcentagem das amostras compactadas com o aumento da intensidade de tráfego e os valores iguais a zero (Tabelas 4 e 5) podem ser explicados pelo fato do aumento do número de passadas dos equipamentos de baldeio, a pressão de pré-consolidação pode aumentar ao seu valor máximo, excedendo a capacidade de suporte de carga do solo, destruindo a sua estrutura e reduzindo, em consequência, as porcentagens de amostras compactadas (DIAS JUNIOR et al., 2008).

4 CONCLUSÕES

A Garra Traçadora foi identificada como o equipamento que promoveu maior degradação da estrutura do solo e independente do equipamento de corte das árvores e do equipamento de baldeio, a maior compactação foi obtida para o número de passadas igual a 7 nas duas profundidades. Sugere-se que os modelos de capacidade de suporte de carga e a pressão de pré-consolidação determinada, após as operações da colheita florestal, sejam utilizados como uma metodologia alternativa para avaliar a qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

- AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. S.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p.122-127, 2009.
- ALTOÉ, F. E. **História e evolução da colheita florestal no Brasil**. 2008. 51 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BELMONTE, G. Z. **Banco de dados sobre legislação, normas e especificações técnicas pertinentes às máquinas utilizadas na colheita florestal**. 2005. 60 p. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, C. **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986a. p. 363-375. (ASA. Agronomy Monograph, 9).
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986b. p. 377-381. (ASA. Agronomy Monograph, 9).
- BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1986. 218 p.
- DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2245-2253, 2008.
- DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. S.; FONSECA, S.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientiae Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, p. 139-151, 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, MG, v. 20, p. 175-182, 1996.

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

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 383 - 409. (ASA. Agronomy Monograph, 9).

LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; VIEIRA, L. B.; MACHADO, C. C.; RINALDI, P. C. N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 369-376, 2006.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 145-164.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estado da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, 2006.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de forwarder com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 68, p. 178-187, 2003.

SILVA, A. R. **Colheita florestal mecanizada e suas implicações nas propriedades físicas e mecânicas de Latossolos**. 2006. 72 p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, S. R.; BARROS, N.; 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, 2006.

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.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley & Sons, 1948. 700 p.

CAPÍTULO 3

**IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL NA
COMPACTAÇÃO DE ALGUMAS CLASSES DE SOLOS
CULTIVADAS COM EUCALIPTO**

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

RESUMO

A principal causa de degradação da estrutura do solo na exploração florestal é o tráfego das máquinas utilizadas na colheita florestal, pois estas operações podem promover compactação do solo afetando o desenvolvimento da floresta. Os objetivos deste estudo foram: a) determinar a suscetibilidade à compactação de algumas classes de solo com diferentes texturas através dos modelos de capacidade de suporte de carga e b) determinar através do uso destes modelos e da pressão de pré-consolidação determinada, após as operações de colheita florestal, o número de passadas dos equipamentos usados na colheita florestal que promovem maior compactação do solo. Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados com amostras de solo indeformadas coletadas nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm de dois Latossolos Vermelhos distróficos típicos (LVd1 e LVd2) e de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico (PVd) situados em Capão Bonito, SP e de um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) e de um Latossolo Vermelho distrófico espessarênico (LVd4) situados em Três Lagoas, MS. As amostragens consistiram de duas etapas, antes e após das operações de colheita florestal. As avaliações envolveram quantificações dos impactos das operações de corte das árvores de eucalipto realizadas com o *Harvester* e *Feller Buncher* e de baldeio da madeira realizadas com o *Forwarder* e *Clambunk*, na compactação do solo, através das pressões de pré-consolidação determinadas após essas operações. As classes de solo de Três Lagoas, MS foram mais suscetíveis à compactação do que as classes de solo de Capão Bonito, SP. O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga e das pressões de pré-consolidação determinadas, após as operações de corte das árvores e baldeio da madeira, permitiram identificar o número de passadas do *Harvester* superior a duas e do *Forwarder* superior a seis; do *Feller Buncher* igual a uma e do *Clambunk* igual a duas como sendo os números de passadas que promoveram maior degradação da estrutura das classes de solos cultivadas com eucalipto devido ao fato desses números de passadas terem causado maior compactação do solo.

Palavras-chave: Pressão de pré-consolidação. Modelos de capacidade de suporte de carga. Degradação da estrutura. Colheita do eucalipto. Mecanização da colheita.

Impacts of forest harvesting operations on the compaction of some soil classes cropped with eucalyptus

ABSTRACT

The main source soil structure degradation in forestry exploration is the machinery traffic used in forest harvesting operations, because these operations may cause soil compaction, with consequent effect on forest development. The objectives of this study were: a) determine susceptibility to compaction of some soil classes with different textures through the load-bearing capacity models and b) determine by the use of these models and the precompression stress determined after forest harvesting operations, the passes number of the equipment used in the forest harvesting that promote greater soil compaction. The uniaxial compression tests were performed using undisturbed soil samples collected in the layers of 0-3cm and 10-13 cm of two typic dystrophic Red Latosol (LVd1 and RLd2) and a dystrophic Red Argisol (PVd) located in Capão Bonito - SP and a typic dystrophic Red Latosol (LVd3) and a dystrophic Red Latosol thick sandy (LVd4) located at Três Lagoas - MS. Two phases were constituted the samples, before and after the harvest forest operations. The assessments involved quantifications the impacts of cutting operations from eucalyptus trees performed with the Harvester and Feller Buncher and wood transport realized with the Forwarder and Clambunk, in soil compaction, through the precompression stress measured after these operations. The soil class from Três Lagoas - MS were more susceptible to compaction soil than Capão Bonito - SP. The use of load-bearing capacity models and the precompression stress determinate after trees cutting operation and wood transport allowed to identify the Harvester passes number greater than two and the Forwarder greater than six; of the Feller Buncher equal to one and of the Clambunk equal to two as being the passes number that promoted further structure degradation of the soil classes cultivated with eucalyptus due to the fact that these passes number have caused greater soil compaction .

Keywords: Precompression stress. Load-bearing capacity models. Structure degradation. Eucalyptus harvest. Mechanized harvest.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto país exportador de celulose do mundo ocupando o décimo quinto lugar nas exportações de papel e papelão, no período de 1997 a 2006, apresentou o maior crescimento efetivo no valor dessas exportações (Carvalho et al., 2010). Este crescimento está associado à produtividade das florestas plantadas, em função do clima e solos favoráveis, com elevada extensão de terras apropriadas ao desenvolvimento do eucalipto, bem como a utilização de tecnologias silviculturais avançadas e ao rápido crescimento da área de plantações florestais (Carvalho et al., 2010; Souza et al., 2010). Além disso, observa-se que o período de maior crescimento efetivo no valor das exportações, coincide com a adoção da colheita florestal, tecnologicamente avançada (Fernandes & Souza, 2003; Lopes et al., 2006), devido à importação de maquinários (Machado & Lopes, 2000; Minette et al., 2008) resultando em um maior rendimento das operações de colheita florestal.

Em vista das importações destes equipamentos, as operações mecanizadas de colheita florestal intensificaram-se no início da década de 90, promovendo como consequência a degradação física acelerada do solo, em função do aumento do tráfego de máquinas (Fernandes & Souza, 2003; Lopes et al., 2006) prejudicando assim as produções desses solos ao longo do tempo (Dias Junior et al., 2007). Desta forma, o desenvolvimento florestal sustentável está relacionado com as operações mecanizadas de colheita florestal (Dias Junior et al., 2007). Assim, a principal fonte de degradação da estrutura do solo é o tráfego das máquinas utilizadas na colheita florestal. O número de passadas das máquinas (Ampoorter et al., 2007, 2010; Debiase et al., 2008; Lopes et al., 2006; Silva et al., 2007) de colheita e baldeio da madeira é uma informação importante para que o desenvolvimento florestal sustentável seja atingido (Dias Junior et al.,

2002), pois essas operações podem causar compactação do solo afetando, em consequência, o desenvolvimento da floresta (Dias Junior et al., 2008).

A compactação do solo provoca diminuição do crescimento das árvores, devido à redução na permeabilidade do solo à água, ao espaço reduzido para o desenvolvimento das raízes, pobre aeração e aumento da resistência do solo à penetração (Grigal, 2000), que podem limitar o crescimento e penetração das raízes (Amppoorter et al., 2010; Jordan et al., 2003; Römken & Miller, 1971). Apesar de Römken & Miller (1971) terem sugerido que a pressão que o sistema radicular deve aplicar ao solo para que este se desenvolva seja maior do que a pressão de pré-consolidação, esses autores não especificaram os valores de umidades restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular. Considerando que a pressão de pré-consolidação depende da umidade (Ajayi et al., 2009; Araujo Junior et al., 2011; Figueiredo et al., 2011; Julião et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011; Severiano et al., 2010a, b) passa ser importante, portanto, considerar em estudos do ambiente físico do solo, às raízes, os modelos de capacidade de suporte de carga, pois permitem estimar as pressões de pré-consolidação em função da umidade do solo.

A compactação do solo pode ser avaliada usando-se várias propriedades do solo, como: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica (Amppoorter et al., 2010; Debiase et al., 2008; Dias Junior et al., 2008; Lopes et al., 2006; Martins et al., 2002; Mendes et al., 2006; Silva et al., 2006) e, atualmente, a pressão de pré-consolidação (Ajayi et al., 2009, 2010; Araujo Junior et al., 2011; Dias Junior et al., 2008; Figueiredo et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011; Severiano et al., 2010a, b). Nesses estudos a pressão de pré-consolidação foi considerada como: (1) um indicador da resistência mecânica do solo (Horn & Fleige, 2003); (2) a máxima pressão que deve ser aplicada ao solo para evitar que a compactação ocorra (Ajayi et al., 2009; Araujo Junior et al., 2011; Severiano et al., 2010a, b); e (3) a pressão que

o sistema radicular deve aplicar ao solo para permitir o alongamento (Römken & Miller, 1971).

Considerando-se esses aspectos, o uso da pressão de pré-consolidação, como um indicador da sustentabilidade da estrutura do solo, sob o ponto de vista mecânico, baseia-se no fato de que esta divide a curva de compressão do solo em duas regiões: uma de deformações elásticas e recuperáveis (região onde não ocorre compactação adicional do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis (região onde ocorre compactação adicional do solo) (Dias Junior & Pierce, 1996; Holtz & Kovacs, 1981). Do exposto, a maior pressão que deve ser aplicada aos solos para evitar a sua compactação adicional é a pressão de pré-consolidação (Araujo Junior et al., 2011; Keller et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011; Silva et al., 2007).

Para minimizar o risco de ocorrer compactação adicional do solo, o tráfego das operações de colheita florestal deve ser feito considerando a pressão de pré-consolidação que é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo (Debiase et al., 2008; Dias Junior et al., 2005; Pacheco & Cantalice, 2011). Além disso, a determinação das variações na pressão de pré-consolidação do solo em função do conteúdo de água pode ajudar no planejamento do tráfego de máquinas, visando evitar a compactação adicional do solo. (Araujo Junior et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011; Severiano et al., 2010a).

Este estudo teve como objetivos: a) determinar a suscetibilidade à compactação de algumas classes de solo com diferentes texturas através dos modelos de capacidade de suporte de carga, e b) determinar através do uso destes modelos e da pressão de pré-consolidação determinada, após as operações de colheita florestal, o número de passadas dos equipamentos usados na colheita florestal que promovem maior compactação do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em áreas comerciais da FIBRIA, unidades de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS que cultiva eucalipto para a produção de celulose. A escolha desses locais deve-se ao fato, das classes de solos de Capão Bonito, SP serem mais argilosas e as de Três Lagoas, MS, mais arenosas.

O município de Capão Bonito, SP, encontra-se à 24° 00' 21" S de latitude e 48° 20' 58" W de longitude com altitude média de 705 m. O clima é subtropical Cfb de acordo com a classificação de Köppen com temperatura média de 21°C. O total anual das precipitações é de 1.285 mm. Os solos da região são classificados como Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1 e LVd2), A moderado, textura argilosa, relevo plano, suavemente ondulado e ondulado e Argissolo Vermelho distrófico, latossólico (PVd), A moderado, textura arenosa/média, relevo suave ondulado (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2006).

O município de Três Lagoas, MS, está localizado à 20° 45' 04" S de latitude e 51° 40' 42" W de longitude com altitude média de 370 m. O clima é tropical quente e úmido Aw, de acordo com a classificação de Köppen com temperatura média de 26°C. O total anual das precipitações está compreendido entre 900 mm e 1.400 mm. Os solos da região foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) e Latossolo Vermelho distrófico espessarênico (LVd4), A moderado, textura média leve, relevo plano e, A moderado, textura média, relevo plano (Embrapa, 2006).

O preparo de solo foi feito através de uma subsolagem a 50 cm de profundidade e com 100 cm de espaçamento aproximadamente. As adubações foram feitas no momento do plantio com formulação NPK mais micronutrientes e três coberturas aos três, seis e doze meses com formulação NK mais micronutrientes. O controle de plantas daninhas e pragas, formigas e outros,

foram realizados ao longo do ciclo de sete anos conforme monitoramento das áreas de plantio.

De acordo com Komatsu (2011) e John Deere (2011), as massas e as pressões aplicadas aos solos, pelos equipamentos usados na colheita florestal, são os seguintes: *Feller Buncher John Deere* modelo 930k com esteira de metal, massa = 27.180 kg, pressão aplicada ao solo 59 kPa, *Harvester John Deere* modelo escavadeira 200DLC, massa = 26.000 kg, pressão aplicada ao solo 47,7 kPa, *Forwarder Valmet-Komatsu* 890.3 6x8 de pneus, com esteiras removíveis para uso em situações de chuvas/declives, massa carregado = 37.100 kg, pressão aplicada ao solo não fornecida pelo fabricante, e *Clambunk Valmet-Komatsu* 890.3 6x8 (*Forwarder* adaptado), com esteiras removíveis para uso em situações de chuvas/declives, massa vazio = 18.000 kg, pressão aplicada ao solo não fornecida pelo fabricante. Esse estudo foi realizado na avaliação de uma condição operacional da FIBRIA, ou seja, os equipamentos foram comparados nas condições em que são operados na empresa, por isso as diferenças do número de passadas de cada equipamento analisado.

As amostragens foram realizadas em duas etapas: antes e após as operações de colheita nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm devido ser esta, a última camada de maior resistência à penetração sendo determinada previamente no campo utilizando-se um penetrômetro de bolso da *Soiltest* modelo CL-700A.

2.1 Amostras coletadas antes do corte das árvores de eucalipto

Para obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga, 15 amostras indeformadas de 6,4 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura foram coletadas aleatoriamente nas camadas 0-3 cm e 10-13 cm, para cada classe de solo em Capão Bonito, SP e em Três Lagoas, MS. A coleta foi realizada em 2010.

As amostras indeformadas foram inicialmente saturadas em uma bandeja com água até 2/3 da altura da amostra, por 24 horas, em seguida foram submetidas ao potencial matricial de - 2 kPa na mesa de tensão e após atingir o equilíbrio, as umidades gravimétricas foram determinadas pelo método da estufa (Gardner, 1986) em duas amostras de cada classe de solo e de cada camada. Os valores de umidades gravimétricas foram multiplicados pelas respectivas densidades do solo (Blake & Hartge, 1986a) obtendo-se dessa forma, os maiores valores de umidades volumétricas. As amostras restantes foram colocadas dentro de um dessecador, para secarem ao longo do tempo no laboratório, obtendo-se assim, a faixa de umidade volumétrica de 0,46 m³ m⁻³ a 0,01, em seguida, essas amostras foram usadas no ensaio de compressão uniaxial (Bowles, 1986) utilizando um consolidômetro da marca *Durham Geo Slope*[®] modelo S-450 *Terraload*.

Na realização dos ensaios de compressão uniaxial, as amostras indeformadas foram submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima, e em seguida essa pressão foi aumentada ao nível seguinte (Taylor, 1948). A partir das curvas de compressão do solo, as pressões de pré-consolidação foram determinadas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995). Aos valores das pressões de pré-consolidação e das umidades volumétricas foi ajustada uma regressão exponencial do tipo $\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$ (Araujo Junior et al., 2011) utilizando o *software Sigma Plot*[®] (Jandel Scientific, San Rafael, CA, USA) que corresponde ao modelo de capacidade de suporte de carga. As letras “a” e “b” representam os parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Durante o processo de ajuste das regressões, também obtiveram-se os intervalos de confiança da população a 95% utilizados na avaliação da compactação promovida pelas operações de colheita florestal, através das pressões de pré-consolidação

determinadas em amostras indeformadas coletadas após a realização das operações de colheita florestal.

Nas comparações dos modelos de capacidade de suporte de carga utilizou-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Os resultados de densidade do solo determinados antes das operações de corte das árvores de eucalipto, foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento experimental inteiramente casualizado, e a comparação das médias foi feita pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

2.2 Amostras coletadas após o corte e baldeio das árvores de eucalipto

Na determinação do efeito das operações de corte e baldeio da madeira sobre a compactação do solo, amostras indeformadas similares àquelas descritas anteriormente, foram coletadas aleatoriamente ao longo das linhas de tráfego dos equipamentos de corte das árvores, *Harvester* e *Feller Buncher* e dos equipamentos de baldeio, *Clambunk* e *Forwarder* nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm como representado na Tabela 1.

As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, conforme mencionado anteriormente, com as umidades nas quais as operações de colheita florestal foram realizadas. Após a realização desses ensaios, as pressões de pré-consolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995) e representadas nos modelos de capacidade de suporte de carga desenvolvidos neste estudo e através dos critérios propostos por Dias Junior et al. (2005) determinou-se a porcentagem de amostras compactadas.

Tabela 1 Número de amostras indeformadas coletadas por camada nas classes de solo de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS para determinar o efeito do tráfego da colheita florestal sobre a compactação do solo nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm

Equipamento e número de passadas	Capão Bonito - SP			Três Lagoas - MS	
	Faz. Peão - LVd2	Faz. Peão - PVD	Faz. Ligiane LVd1	Faz. Matão LVd4	Faz. Palmito LVd3
Número de amostras indeformadas coletadas por camada					
H8F60				20	
H4F36					20
H2F10	4				
H2F8	4				
H2F6		4			
H2F5		3			
H2F4	3	6			
H2F2	3	7			
Fe1C1			16		
Fe1C2			4		

H = Harvester; F = Forwarder, Fe = Feller Buncher, C = Clambunk. Os números após as letras indicam o número de passadas dos equipamentos.

O excesso de solo das partes superiores e inferiores dos cilindros das amostras indeformadas coletadas nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm foram utilizadas nas seguintes análises de caracterização física: análise granulométrica (Gee & Bauder, 1986) e densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986b) (Tabela 2).

Na Tabela 2 são demonstrados os resultados das análises de caracterização física e classes texturais determinadas de acordo com Gee & Bauder (1986) para as das classes de solo de Capão Bonito, SP e de Três Lagoas, MS.

Tabela 2 Resultados das análises de caracterização física e classes texturais determinadas de acordo com Gee & Bauder (1986) para as classes de solo de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS

Fazenda	Classe de Solo	D_p^1 $Mg\ m^{-3}$	----- g kg ⁻¹ -----			Classe Textural
			Argila	Silte	Areia	
Capão Bonito, SP						
0 – 3 cm						
Ligiane	LVd1	2,66 ²	277 ²	87	636	Franco Argilo Arenoso
Peão	LVd2	2,51	507	237	256	Argila
Peão	PVd	2,59	180	273	547	Franco Arenoso
10 – 13 cm						
Ligiane	LVd1	2,66	313	77	610	Franco Argilo Arenoso
Peão	LVd2	2,62	513	227	260	Argila
Peão	PVd	2,68	190	250	560	Franco Arenoso
Três Lagoas, MS						
0 – 3 cm						
Palmito	LVd3	2,68	143 ⁴	37	820	Franco Arenoso
Matão	LVd4	2,69	67	27	906	Areia
10 – 13 cm						
Palmito	LVd3	2,71	163	40	797	Franco Arenoso
Matão	LVd4	2,73	80	33	887	Areia

1 = Densidade de partículas, 2 = média de 3 repetições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As classes de solo de Três Lagoas, MS apresentaram densidade do solo inicial igual ou maior do que as classes de solo de Capão Bonito, SP, tanto na camada de 0-3 cm quanto na de 10-13 cm. As camadas de 10-13 cm apresentaram maior densidade do solo inicial do que a camada de 0-3 cm no Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1) Fazenda Ligiane, Capão Bonito, SP, Argissolo Vermelho distrófico, latossólico (PVd) Fazenda Peão, Capão Bonito, SP e Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) Fazenda Palmito, Três Lagoas, MS (Tabela 3).

Tabela 3 Valores das densidades do solo iniciais das amostras indeformadas coletadas antes das operações de colheita florestal nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm

Camada cm	Fazenda e Classe de solo				
	Capão Bonito, SP		Três Lagoas, MS		
	Ligiane LVd1	Peão LVd2	Peão PVd	Palmito LVd3	Matão LVd4
	Dsi¹ (Mg m⁻³)				
0-3	1,31 ² Aa	1,17Aa	1,44Ca	1,45Ca	1,56Da
10-13	1,43Bb	1,19Aa	1,55Cb	1,56Cb	1,62Ca

1 = Densidade do solo inicial (antes do tráfego), 2 = média de 15 repetições. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Os coeficientes lineares e angulares dos modelos de capacidade de suporte de carga das classes de solo são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 Coeficientes lineares (a) e angulares (b) dos modelos de capacidade de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] para as classes de solos de Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS

Fazenda, Classe de solo	a	b	R ²	n
Capão Bonito, SP				
Antes da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga				
0-3 cm				
Ligiane (LVd1)	2,76	- 1,81	0,95**	15
Peão (LVd2)	2,84	- 1,68	0,95**	15
Peão (PVd)	2,84	- 1,18	0,96**	15
10-13 cm				
Ligiane (LVd1)	2,77	- 1,90	0,93**	15
Peão (LVd2)	2,83	- 1,65	0,94**	15
Peão (PVd)	2,82	- 1,94	0,92**	15
Depois da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga				
0-3 cm e 10-13 cm				
Ligiane (LVd1)	2,77	- 1,86	0,94**	30
Peão (LVd2)	2,83	- 1,66	0,94**	30
Peão (PVd)	2,83	- 2,06	0,94**	30
Ligiane (LVd1) e Peão (PVd)	2,80	- 1,96	0,93**	60
Três Lagoas, MS				
Antes da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga				
0-3 cm				
Palmito (LVd3)	2,48	- 2,56	0,93**	15
Matão (LVd4)	2,46	- 2,44	0,95**	15
10-13 cm				
Palmito (LVd3)	2,68	- 2,44	0,96**	15
Matão (LVd4)	2,57	- 2,25	0,93**	15
Depois da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga				
0-3 cm				
Palmito (LVd3) e Matão (LVd4)	2,45	- 2,25	0,92**	30

R² = coeficiente de determinação; n = número de amostras indeformadas.

O teste de comparação do modelo de capacidade de suporte de carga da camada de 0-3 cm e o da camada de 10-13 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1) Fazenda Ligiane, Capão Bonito, SP não diferiram estatisticamente. O mesmo ocorreu para o modelo da camada de 0-3 cm e o da camada de 10-13 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2) Fazenda Peão, Capão Bonito, SP e para o modelo da camada de 0-3 cm e o da camada de 10-13 cm do Argissolo Vermelho distrófico, latossólico (PVd) Fazenda Peão,

Capão Bonito, SP. O modelo de capacidade de suporte de carga das camadas de 0-3 cm e 10-13 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1) Fazenda Ligiane, Capão Bonito, SP e o das camadas 0-3 e 10-13 cm do Argissolo Vermelho distrófico (PVd) Fazenda Peão, Capão Bonito, SP, também não diferiram estatisticamente. O mesmo ocorreu com o modelo de capacidade de suporte de carga da camada de 0-3 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) Fazenda Palmito, Três Lagoas, MS e o modelo da camada de 0-3 cm do Latossolo Vermelho distrófico espessarênico (LVd4) Fazendas Matão, Três Lagoas, MS. Para essas condições, os valores das pressões de pré-consolidação e os das umidades volumétricas foram agrupados para cada condição, e em seguida foi ajustado, em cada condição, uma nova equação (Tabela 5).

Tabela 5 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)

Fazenda, Classe de solo e Camada	F	a	b
Capão Bonito, SP			
Ligiane (LVd1) 0-3 x 10-13 cm	H	ns	ns
Peão (LVd2) 0-3 x 10-13 cm	H	ns	ns
Peão (PVd) 0-3 x 10-13 cm	H	ns	ns
Ligiane (LVd1) 0-3 e 10-13 cm x Peão (PVd) 0-3 e 10-13cm	H	ns	ns
Ligiane (LVd1) 0-3 e 10-13 cm e peão (PVd) 0-3 e 10-13cm x peão (LVd2) 0-3 x 10-13 cm	H	**	**
Três Lagoas, MS			
Palmito (LVd3) 0-3 x 10-13 cm	H	**	ns
Matão (LVd4) 0-3 x 10-13 cm	H	**	ns
Palmito (LVd3) 0-3 x Matão (LVd4) 0-3 cm	H	ns	ns
Palmito (LVd3) 0-3 cm e Matão (LVd4) 0-3 cm x Palmito (LVd3) 10-13 cm	H	**	ns
Palmito (LVd3) 0-3 cm e Matão (LVd4) 0-3 cm x Matão (LVd4) 10-13 cm	H	**	ns
Palmito (LVd3) 10-13 cm x Matão (LVd4) 10-13 cm	H	**	ns
Camada 0-3 cm Capão Bonito, SP x Camada 0-3 cm Três Lagoas, MS			
Ligiane (LVd1) e Peão (PVd) x Palmito (LVd3) e Matão (LVd4)	H	**	**
Peão (LVd2) x Palmito (LVd3) e Matão (LVd4)	H	**	ns
Ligiane (LVd1) e Peão (PVd) x Palmito (LVd3)	H	**	ns
Ligiane (LVd1) e Peão (PVd) x Matão (LVd4)	H	**	ns

H = homogêneo; ** significativo ao nível de 1%; ns = não significativo.

Nas condições em que os modelos de capacidade de suporte de carga foram estatisticamente diferentes, os valores das pressões de pré-consolidação e os das umidades volumétricas não foram agrupados (Tabela 5).

As camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm, das classes de solos situadas em Capão Bonito, SP, são mais resistentes à compactação, e as das classes de solos situadas em Três Lagoas, MS, são mais suscetíveis à compactação (Figuras 1 e 2). De acordo com Severiano et al. (2008), esse comportamento pode ser explicado pelas diferenças nas texturas das classes de solos. As classes de solo de Três Lagoas, MS, são mais arenosas e devido ao menor grau de desenvolvimento de sua estrutura, conforme observações de campo possuem estrutura do tipo grãos simples e blocos subangulares fracamente desenvolvidos que se desfazem em grânulos, tendem a apresentar maior densidade do solo (Tabela 3), menor coesão entre partículas e menor capacidade de suporte de carga sendo, portanto, mais suscetíveis à compactação. Esse resultado concorda com Ampoorter et al. (2007) ao observarem que os solos arenosos são mais propensos à compactação do que os argilosos. Já as classes de solos de Capão Bonito, SP, são mais argilosas e tendem a ter estrutura mais desenvolvida, do tipo blocos subangulares, moderadamente desenvolvidos que se desfazem em grânulos, menor densidade do solo (Tabela 3), maior coesão entre partículas e maior capacidade de suporte de carga sendo, portanto, mais resistentes à compactação. A maior capacidade de suporte de carga dos solos tem sido atribuída à maior coesão do solo (Gontijo et al., 2008; Oliveira et al., 2011; Severiano et al., 2010c).

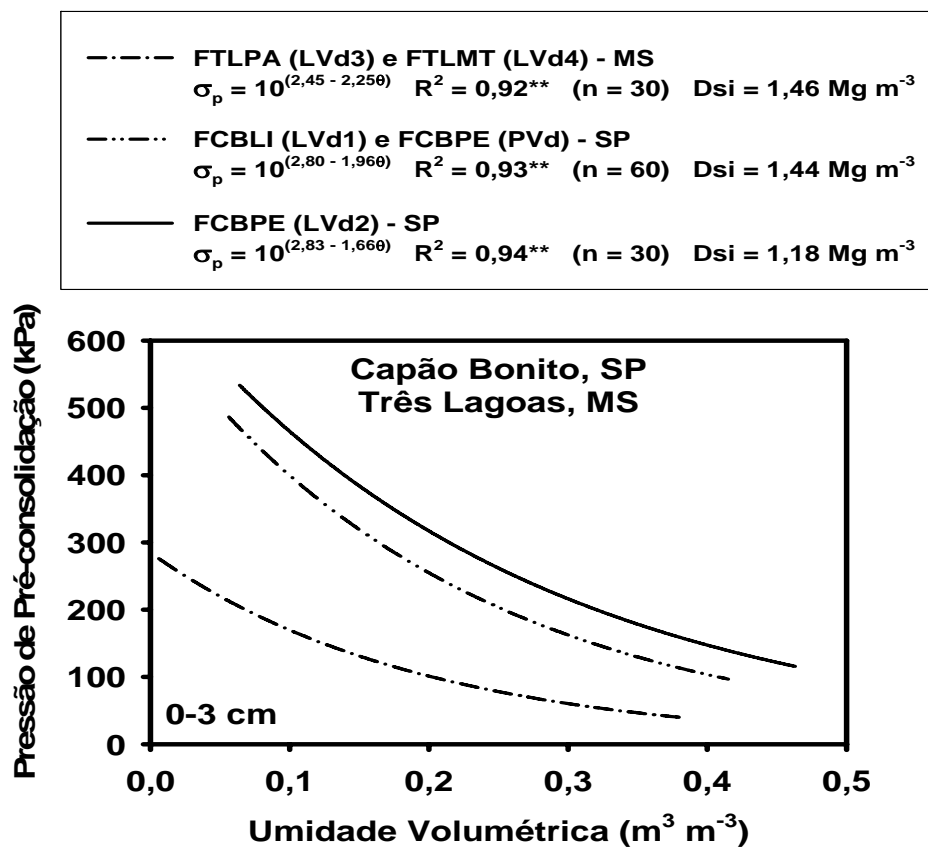


Figura 1 Modelos de capacidade de suporte de carga das Unidades de Capão Bonito, SP e de Três Lagoas, MS para a camada de 0-3 cm

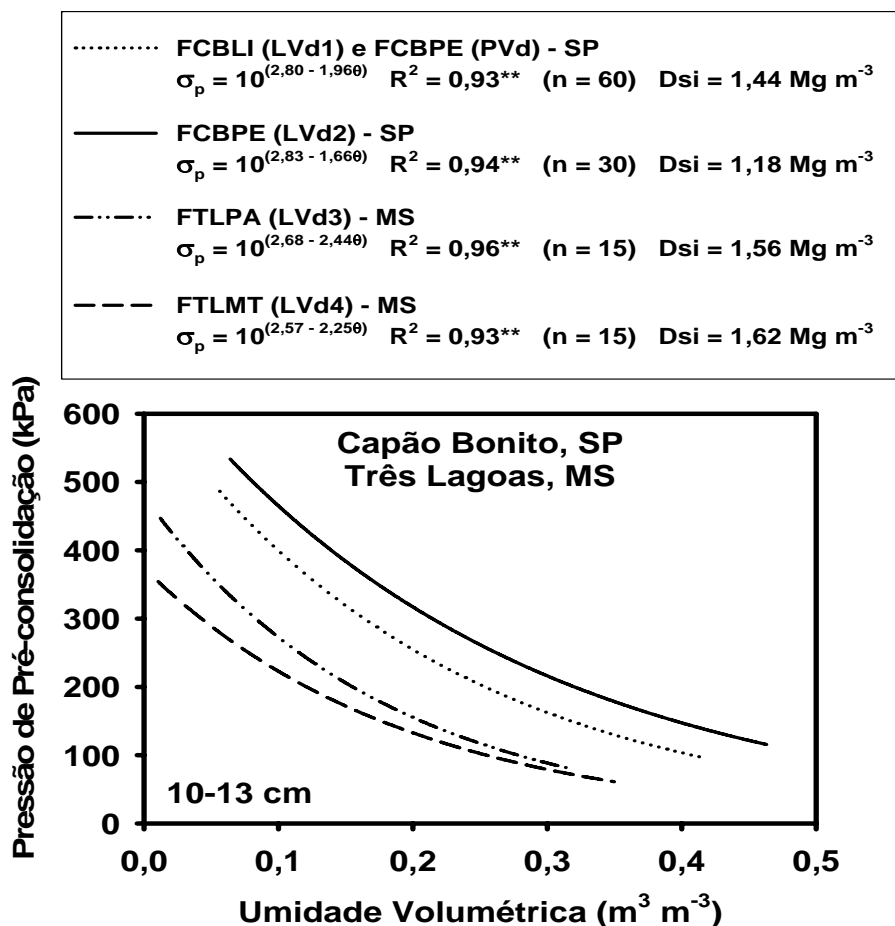


Figura 2 Modelos de capacidade de suporte de carga das Unidades de Capão Bonito, SP e de Três Lagoas, MS para a camada de 10-13 cm

Considerando-se que a pressão de pré-consolidação é a pressão que o sistema radicular tem que vencer para se desenvolver (Römken e Miller, 1971), as classes de solos de Capão Bonito, SP, em função desta maior capacidade de suporte de carga, podem oferecer maior resistência ao desenvolvimento do sistema radicular do que as de Três Lagoas, MS.

As tabela 6, 7 e 8 foram obtidos de acordo com os critérios propostos por Dias Junior et al. (2005).

As intensidades de tráfego que promoveram maior degradação da estrutura do LVd2, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão, SP foram H2F10 (duas passadas do *Harvester* e dez passadas do *Forwarder*), pois causaram compactação em 100% das amostras coletadas nas camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm, enquanto as intensidades de tráfego duas passadas do *Harvester* e oito passadas do *Forwarder* (H2F8) promoveram compactação em 50% e 100% das amostras coletadas nas camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm, respectivamente (Tabela 5). A intensidade de tráfego constituída de duas passadas do *Harvester* e duas passadas do *Forwarder* (H2F2) não promoveram compactação nas amostras coletadas nas camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm. As outras intensidades de tráfego tiveram comportamento intermediário em relação à compactação.

Tabela 6 Porcentagem de amostras compactadas de acordo com Dias Junior et al. (2005), para um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2)

Fibria Capão Bonito - Fazenda Peão, SP - LVd2			
H2F10 n = 4	H2F8 n = 4	H2F4 n = 3	H2F2 n = 3
		0-3 cm	
100%	50%	34%	0%
		10-13 cm	
100%	100%	34%	0%

H = *Harvester*; F = *Forwarder*; n = número de amostras coletadas. Os números após as letras H e F indicam o número de passadas dos equipamentos.

As intensidades de tráfego promoveram degradação generalizada da estrutura da camada 0-3 cm do PVd, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão, SP (Tabela 6), pois causaram compactação em 100% das amostras coletadas na camada de 0-3 cm. Na camada de 10-13 cm, a pior situação ocorreu na intensidade de tráfego duas passadas do *Harvester* e seis passadas do *Forwarder* (H2F6), enquanto que as intensidades de tráfego duas passadas do *Harvester* e cinco passadas do *Forwarder* (H2F5) e duas passadas do *Harvester* e quatro passadas do *Forwarder* (H2F4) causaram compactação em 67% das amostras.

As intensidades de tráfego duas passadas do *Harvester* e duas passadas do *Forwarder* (H2F2) foram as que promoveram menor compactação (43%) nesta camada. Estes resultados podem ser explicados pela menor capacidade de suporte de carga do PVd, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão em comparação com o LVd2, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão, SP (Figuras 5 e 6). Essa menor capacidade de suporte de carga do PVd, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão, SP faz com que esse solo sofra maior compactação a uma frequência de tráfego menor do que o LVd2, Fibria Capão Bonito Fazenda Peão, SP.

Tabela 7 Porcentagem de amostras compactadas, de acordo com os critérios propostos por DIAS JUNIOR et al. (2005), para um Argissolo Vermelho distrófico, latossólico (PVd)

Fibria Capão Bonito - Fazenda Peão, SP - PVd			
H2F6 n = 4	H2F5 n = 3	H2F4 n = 6	H2F2 n = 7
		0-3 cm	
100%	100%	100%	100%
		10-13 cm	
100%	67%	67%	43%

H = *Harvester*; F = *Forwarder*; n = número de amostras coletadas. Os números após as letras H e F indicam o número de passadas dos equipamentos.

As intensidades de tráfego oito passadas do *Harvester* e sessenta passadas do *Forwarder* (H8F60) promoveram compactação em 100% das amostras coletadas nas camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm, no LVd4, Fibria Três Lagoas Fazenda Matão, MS (Tabela 7). O mesmo ocorreu nas camadas de 0-3 cm e de 10-13 cm, no LVd3, Fibria Três Lagoas Fazenda Palmito, MS para quatro passadas do *Harvester* e trinta e seis passadas do *Forwarder* (H4F36) (Quadro 8). A camada de 0-3 cm dessas classes de solos sofreu degradação de sua estrutura semelhante (100% das amostras compactadas) devido ao fato delas terem capacidades de suporte de carga iguais (Figura 1). Apesar da camada de 10-13 cm do LVd3, Fibria Três Lagoas Fazenda Palmito ter maior capacidade de suporte de carga do que o LVd4, Fibria Três Lagoas Fazenda Matão (Figura 2)

ela não foi suficiente para suportar o excessivo número de passadas do *Forwarder* (trinta e seis passadas), as quais promoveram compactação em 100% das amostras independente da diferença na capacidade de suporte de carga.

As intensidades de tráfego, uma passada do *Feller Buncher* e duas passadas do *Clambunk* (F1C2) foram as que promoveram maior degradação da estrutura do LVd1, Fibria Capão Bonito Fazenda Ligiane, SP, pois promoveram compactação em 100% das amostras coletadas nas camadas de 0-3 cm e 10-13 cm (Tabela 8).

Tabela 8 Porcentagem de amostras compactadas, de acordo com os critérios propostos por DIAS JUNIOR et al. (2005), para um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd1), Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd3) e Latossolo Vermelho distrófico espessarênico (LVd4)

Fibria Capão Bonito Fazenda Ligiane, SP (LVd1)	Fibria Três Lagoas Fazenda Palmito, MS (LVd3)	Fibria Três Lagoas Fazenda Matão, MS (LVd4)
FeC1 (n = 16)	FeC2 (n = 4)	H4F36 (n = 20) H8F60 (n = 20)
		0-3 cm
75%	100%	100%
		10-13 cm
63%	100%	100%

Fe = *Feller Buncher*; C = *Clambunk*; H = *Harvester*; F = *Forwarder*; n = número de amostras coletadas. Os números após as letras Fe, C, H e F indicam o número de passadas dos equipamentos

Os resultados, obtidos neste estudo, concordam com outros pesquisadores (Dias Junior et al., 2008; Fernandes & Souza, 2003; Hamza & Anderson, 2005; Lopes et al., 2006; Schäffer et al., 2007; Seixas et al., 2003; Silva et al., 2007), que observaram grande degradação da estrutura do solo com o aumento do número de passadas das máquinas florestais.

O número de passadas do *Harvester*, superior a duas e do *Forwarder* superior a seis, foram identificadas, neste estudo, como sendo as operações de colheita florestal que promoveram maior compactação do solo (Tabelas 5, 6 e 7), concordando com Dias Junior et al. (2005, 2007), que identificaram a operação

de baldeio realizada com um *Forwarder*, como sendo a que promoveu maior compactação do solo. Entretanto, os resultados obtidos neste estudo indicam que as operações de colheita florestal realizadas com o *Feller Buncher* e *Clambunk* também promoveram compactação do solo, principalmente, quando o número de passadas do *Clambunk* foi igual a duas (Tabela 8) concordando com Lopes et al. (2006).

Considerando que as operações de baldeio da madeira são as que mais degradam a estrutura do solo (Dias Junior et al., 2005, 2007), e que elas ocorrem no final do ciclo do eucalipto, ou seja, uma vez a cada sete anos, esses resultados indicam a necessidade de continuidade deste estudo, durante um ciclo do eucalipto, visando verificar a recuperação natural da estrutura destas classes de solo através do uso dos modelos de capacidade de suporte de carga e da pressão de pré-consolidação determinadas ao longo do tempo.

4 CONCLUSÕES

As classes de solo de Três Lagoas, MS foram mais suscetíveis à compactação do que as classes de solo de Capão Bonito, SP.

O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga e das pressões de pré-consolidação determinadas, após as operações de corte das árvores e baldeio da madeira, permitiram identificar o número de passadas do *Harvester* superior a duas e do *Forwarder* superior a seis; do *Feller Buncher* igual a uma e do *Clambunk* igual a duas como sendo os números de passadas que promoveram maior compactação das classes de solos cultivadas com eucalipto em Capão Bonito, SP e Três Lagoas, MS.

REFERÊNCIAS

- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAUJO-JUNIOR, C.F.; SOUZA, T.T.S. & VASCONCELOS JUNIOR, A.I. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Till. Res.*, 105:122-127, 2009.
- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; OKUNOLA, A.; SOUZA, T.T.S. & PIRES, B.S. Assessment of vulnerability of Oxisols to compaction in the Cerrado region of Brazil. *Pedosphere*, 20:252-260, 2010.
- AMPOORTER, E.; GORIS, R. CORNELIS, W.M. & VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecol. Manage.*, 241:162-174, 2007.
- AMPOORTER, E.; VAN NEVEL, L.; DE VOS, B.; HERMY, M. & VERHEYEN, K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecol. Manage.*, 260:1664-1676, 2010.
- ARAUJO JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:115-131, 2011.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, C. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd. ed. Madison: American Society Agronomy, 1986a. p. 363-375. (ASA. Agronomy Monograph, 9).
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. (Agronomy Monograph, 9). 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986b. p. 377-381. (ASA. Agronomy Monograph, 9).
- BOWLES, J.E. *Engineering properties of soils and their measurements*. 3rd. ed. New York: McGraw Hill, 1986. 218 p.
- CARVALHO, K.H.A.; COSTA, C.C.M.; SOARES, N.S. & SILVA, M.L. Desempenho das exportações brasileiras de papel. *Sci. For.*, 38:263-271, 2010.

DEBIASE, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O. & MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. R. Bras. Ci. Solo, 32:2629-2637, 2008.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JUNIOR, C.F. & SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. Pesq. Agropec. Bras., 42:257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C. & AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. Cerne, 8:103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E. & ARAÚJO JUNIOR, C.F. Traffic effects on the preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. Sci. Agric., 62:248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technol., 8:139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, S.R.; SANTOS, N.S. & ARAUJO-JUNIOR, C.F. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. R. Bras. Ci. Solo, 32:2245-2253, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de um latossolo vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". Rev. Árv., 27:279-284, 2003.

FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S.O. & ALMEIDA, B.G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. R. Bras. Ci. Solo, 35:389-402, 2011.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 493 - 544. (ASA. Agronomy Monograph, 9).

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 383 - 409. (ASA. Agronomy Monograph, 9).

GRIGAL, D.F. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Ecol. Manage.*, 138:167-185, 2000.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. & ARAÚJO JUNIOR, C.F. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de Cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2.227-2.234, 2008.

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

HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

HORN, R. & FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soil. *Soil Till. Res.*, 73:89-99, 2003.

JOHN DEERE. Disponível em < <http://www.deere.com.br> >. Acesso em: 27 maio 2011.

JORDAN, D.; PONDER, F.J. & HUBBARD, V.C. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Appl. Soil Ecol.*, 23:33-41, 2003.

JULIÃO, L.G.F.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, G.C.; RIBEIRO, B.T. & MAGALHÃES, C.A.S. Atributos mecânicos e erosão por salpicamento em amostras de latossolo vermelho-amarelo sob efeito de vinhaça. *Ciênc. Agrotec.*, 35:19-27, 2011.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C. & RINALDI, P.C.N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. *Rev. Árv.*, 30:369-376, 2006.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. & DEXTER, A.R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163:13-23, 2011.

KOMATSU. Disponível em <<http://www.komatsuforest.com.br>>. Acesso em: 27 maio 2011.

MACHADO, C.C. & LOPES, E.S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. *Cerne*, 6:124-1129, 2000.

MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N. & FERREIRA, M.M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. *Cerne*, 8:32-41, 2002.

MENDES, F.G.; MELLONI, E.G.P. & MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estado da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. *Cerne*, 12: 211-220, 2006.

MINETTE, L.J.; SILVA, E.N.; FREITAS, K.E.; SOUZA, A.P. & SILVA, E.P. Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada em Niquelândia, Goiás. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 12:659-665, 2008.

OLIVEIRA, V.S.; ROLIM, M.M.; COSTA, Y.D.J.; PEDROSA, E.M.R. & SILVA, E.F.F. Compressibilidade de um argissolo amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 15:435-442, 2011.

PACHECO, E.P. & CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:403-415, 2011.

RÖMKENS, M.J.M. & MILLER, R.D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. *Plant and Soil*, 35:237-248, 1971.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W. & SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: soil physical and mechanical aspects. *Soil Till. Res.*, 93:28-43, 2007.

SEIXAS, F.; KOURY, C.G.G. & RODRIGUES, F.A. Determinação da área impactada pelo tráfego de Forwarder com uso de GPS. *Sci. For.*, 68:178-187, 2003.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C. DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C. & CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C. DIAS JUNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C. & COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I – modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Eng. Agríc.*, 30:404-413, 2010a.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C. DIAS JUNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C. & COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II – quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Eng. Agríc.*, 30:414-423, 2010b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C. DIAS JUNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B. & MAGALHÃES, E.N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim tifton 85. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 14:39-45, 2010c.

SILVA, S.R.; BARROS, N. & COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 10:842-847, 2006.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S. & LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:89-93, 2007.

SNEDECOR, G. W. & COCHRAN, W. G. *Statistical methods*. 8. ed. Iowa State University Press, Ames, Iowa. 1989. 503p.

SOUZA, E.P.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L. & VALVERDE, S.R. Desempenho do setor florestal para a economia brasileira: uma abordagem da matriz insumo-produto. *Rev. Árv.*, 34:1129-1138, 2010.

TAYLOR, D.W. Fundamentals of soil mechanics. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1948, 700p.

CAPÍTULO 4

**COMPACTION CAUSED BY MECHANIZED OPERATIONS IN A
RED- YELLOW LATOSOL CULTIVATED WITH COFFEE OVER
TIME**

**COMPACTAÇÃO CAUSADA PELAS OPERAÇÕES MECANIZADAS
EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO CULTIVADO COM
CAFEEIROS AO LONGO DO TEMPO**

Normas da Revista Ciência e Agrotecnologia

ABSTRACT

The main source of soil structure degradation in coffee plantation is the machinery traffic because these operations may cause soil compaction affecting the crop development. This study had as objective to generate the load-bearing capacity models for an Red-Yellow Latosol and to determine through the use of these models the soil susceptibility to compaction, due to the establishment time of the coffee plantation and the impacts caused by the machinery traffic on the traffic lines located at the bottom and the top of interrow, considering the slope of the ground. This study was carried out in the EPAMIG - Experimental Farm (Agricultural Research Company of Minas Gerais), located at Três Pontas - MG, in coffee plantations (*Coffea arabica* L.) with 2, 7, 18 and 33 years of establishment. The slope of the plot interrows was 0-3%. To obtain the load-bearing capacity models, 12 undisturbed soil samples were randomly collected in the 0-3 cm and 15-18 cm layers in the center of interrows for each establishment time of the coffee plantation. It was also randomly collected 10 undisturbed soil samples for each establishment time of the coffee plantations along the tractor traffic lines located at the bottom and the top of the interrow considering the slope of the ground. These soil samples were used in the uniaxial compression tests. The use of the load-bearing capacity models allowed to identify areas with coffee trees with planting times 7, 18 and 33 years, as being the most susceptible to compaction for lower moisture than $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for the layer of 0-3 cm and at any volumetric moisture content for the layer of 15-18 cm. The coffee trees plantation with 2 years of establishment was the most resistant to compaction for volumetric moisture content higher than $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for the layer of 0-3 cm and at any volumetric moisture content for the layer of 15-18 cm. The no statistical difference between the load-bearing capacity models for the coffee plantation establishment times of 7, 18 and 33 years in the layers 0-3 and 15-18 cm is a natural recovery indicative of the soil structure. The compaction of the traffic line located at the bottom of the interrow, considering the slope was equal to or greater than the compaction in the traffic line located at the top of the interrow.

Keywords: Precompression stress. Compaction. Coffee.

RESUMO

A principal fonte de degradação da estrutura do solo na exploração cafeeira é o tráfego de máquinas, pois essas operações podem causar compactação do solo afetando o desenvolvimento da cultura. Este estudo teve como objetivos gerar os modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho-Amarelo e determinar através do uso desses modelos a suscetibilidade à compactação do solo, devido ao tempo de implantação da lavoura cafeeira e os impactos causados pelo tráfego das operações mecanizadas nas linhas de tráfego localizadas na parte inferior e superior da entrelinha, considerando o declive do terreno. Este estudo foi realizado na Fazenda Experimental da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), situada em Três Pontas, MG, em talões com cafeeiros (*Coffea arabica* L.) com 2, 7, 18 e 33 anos de implantação. A declividade da entrelinha dos talões foi de 0-3%. Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga, 12 amostras indeformadas de solo foram coletadas aleatoriamente nas camadas 0-3 e 15-18 cm no centro das entrelinhas para cada tempo de implantação de talões com cafeeiros. Foram também coletadas aleatoriamente 10 amostras indeformadas para cada tempo de implantação dos talões com cafeeiros ao longo das linhas de tráfego do trator situadas na parte inferior e superior da entrelinha considerando o declive do terreno. Essas amostras foram usadas no ensaio de compressão uniaxial. O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga permitiu identificar as áreas com cafeeiros com tempos de plantio 7, 18 e 33 anos como sendo os mais suscetíveis à compactação para umidades menores do que $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada de 0-3 cm e para qualquer umidade na camada de 15-18 cm. Para os talões com cafeeiros com 2 anos de implantação foi o mais resistente à compactação para umidades maiores do que $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada 0-3 cm e para qualquer umidade na camada de 15-18 cm. A não diferença estatística entre os modelos de capacidade de suporte de carga para os tempos de implantação da lavoura cafeeira 7, 18 e 33 anos nas camadas de 0-3 e 15-18 cm é um indicativo da recuperação natural da estrutura do solo. A compactação na linha de tráfego situada na parte inferior da entrelinha, considerando o declive foi igual ou maior do que a compactação na linha de tráfego situada na parte superior da entrelinha.

Palavras-chave: Pressão de pré-consolidação. Compactação. Cafeeiro.

1 INTRODUCTION

The coffee culture was introduced in Brazil in 1727 and throughout its history had increase and crises in accordance with changes in the global economy (Ormond et al., 1999). However, due to adaptation of the coffee plants to the soil conditions and climate, and also by increasing the plant area (Instituto Agronômico de Campinas - IAC, 2011), nowadays Brazil is the first producer and the second world consumer of the product (Associação Brasileira da Indústria do Café - ABIC, 2010). Currently, domestic production accounts for 39.6% of the world production, reaching in 2010 a production of 39 million bags (60 kg) (Anuário da Agricultura Brasileira - Agrianual, 2011). The main producing States are Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná and Bahia (Santos et al., 2010).

Among the technologies used to promote the development of the coffee culture can cite the mechanization (Santos et al., 2010). However, the intensive and indiscriminate use of the mechanization in the soils cultivated with coffee has changed the soil structure, promoting compaction over the years (Gontijo et al., 2008; Santos et al., 2009, 2010; Araujo Junior et al., 2011a, 2011b) affecting the growth and longevity coffee plants due to the changes in the environment where the root system develops (Araujo Junior et al., 2011b), making the plants more susceptible to dry spells by altering the water flow, promoting inadequate aeration and nutritional deficiency and high soil mechanical strength which may limit root growth (Araujo Junior et al., 2011a, 2011b).

Soil compaction can be assessed using various soil physical properties such as bulk density, total porosity, penetration resistance, hydraulic conductivity (Dias Junior & Pierce, 1996) and, from 1999 (Kondo & Dias Junior, 1999) the precompression stress, started being used to assess the soil compaction. Currently, precompression stress using to evaluate the soil

compaction is well documented in the literature (Ajayi et al., 2009; Araujo Junior et al., 2011a, 2011b).

To minimize the risk of soil compaction occurring, machinery traffic should be planned considering the precompression stress, which is a measure of the load-bearing capacity of the soil (Dias Junior et al., 2005). Moreover, the determination of the variations in the precompression stress as a function of soil water content can help to schedule the machinery traffic, to prevent soil compaction (Santos et al., 2010).

Considering that the precompression stress is the maximum pressure that should be applied to the soil in order to avoid soil compaction and the criteria proposed by Dias Junior et al. (2005), this study aimed to generate the load-bearing capacity models for a Red-Yellow Latosol (Oxisol) and to determine through the use of these models the susceptibility to compaction of the coffee plantation due to the establishment time and the compaction caused by the machinery traffic on the traffic lines located at the top and bottom of the ground.

2 MATERIALS AND METHODS

This study was carried out at the Experimental Farm of EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), located at Três Pontas, South of Minas Gerais State, latitude 21° 22' 01" S and longitude 45° 30' 46" W of Greenwich and average altitude of 905 m. The climate is tropical of altitude Cwa according to the Köppen classification with a mean annual temperature of 19° C. The total annual precipitation range from 1,400 to 1,700 mm.

The soil of the study area was classified as a Red-Yellow Latosol (Oxisol) loamy texture (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa 2006) with 490 g kg⁻¹ of clay, 290 g kg⁻¹ of silt and 220 g kg⁻¹ of sand.

This study was conducted in coffee plantations (*Coffea arabica* L.) with 2, 7, 18 and 33 years of establishment. According to the area history prior to the installation of the coffee plantations, the soil was plowed to a 40 cm deep and then harrowed.

All equipment used in the coffee crop management were pulled by a Massey Ferguson 265 tractor, with a mass about 3,940 kg in which it was engaged the following equipment: fertilizer miname with the mass approximate of 210 kg (3 passes per year), spray jet Arbus 400 Jacto, 400 L capacity and mass of 230 kg (3 passes per year), mower Kamaq with a mass of 340 kg (3 passes per year) and the spray jet PH 400 with 400 L capacity and mass of 210 kg (2 passes per year). The total number of passes per year is equal to 11 times in the same traffic line for each plot at different establishment times.

To obtain the load-bearing capacity models which are the relation between the precompression stress and the volumetric water content, 12 undisturbed soil samples of 6.4 cm in diameter and 2.54 cm height were collected randomly between the rows in the 0-3 cm and 15-18 cm layers, for each plot cultivated with coffee by 2, 7, 18 and 33 years totaling 96 undisturbed soil samples (12 undisturbed soil samples x 2 layers x 4 ages). These undisturbed soil samples were collected in 2010 in plots with a slope of 0-3%.

These undisturbed soil samples were initially saturated in a pan with water to 2/3 of the soil samples height for 24 hours, and then they were air-dried in the laboratory until the volumetric water content was found in the range of 0.42 to 0.05 m³ m⁻³, and then used in uniaxial compression test (Bowles, 1986).

To perform the uniaxial compression tests, the undisturbed soil samples were kept inside the aluminum cylinders, which were placed inside the compression cell and subjected to pressures of 25, 50, 100, 200, 400, 800 and 1,600 kPa. Each pressure was applied until 90% of the maximum deformation was reached, and then the pressure was increased to the next level (Taylor,

1948). From the soil compression curves, the precompression stresses (σ_p) were determined as a function of the volumetric water contents (θ) (Dias Junior & Pierce, 1995). Then, the regression analyses were performed using the Sigma Plot software (Jandel Scientific, PO Box 7005, San Rafael, CA, USA), to obtain the load-bearing capacity model, which is the adjustment of σ_p as a function of θ . After that, the regression comparisons equations were made using the procedure described in Snedecor & Cochran (1989). For each condition in which the load-bearing capacity models were homogeneous, and the linear (a) and the angular (b) coefficients were not statistically different, the values of σ_p and θ were grouped and a new equations were adjusted considering all these values. However, when the load-bearing capacity models were homogeneous, but the linear (a) and/or angular (b) coefficients differed significantly the values of σ_p and θ were not grouped.

To determine the compaction caused by the machinery used in the coffee crop management over time, 10 undisturbed soil samples similar to those described above were collected randomly along the traffic lines located at the top and bottom of the ground totaling 160 soil samples (10 undisturbed soil samples x 4 ages x 2 layers x 2 positions).

These undisturbed soil samples were subjected to the uniaxial compression test, as described earlier, at the volumetric water content in which the mechanized operations were performed. After these tests performance, the σ_p were obtained according Dias Junior & Pierce (1995) and then represented in the load-bearing capacity models developed in this study as a function of the θ and using the criteria proposed by Dias Junior et al. (2005) the percentage of compacted soil samples were determined which allowed us to quantify the compaction caused by the machinery traffic on the traffic lines located at the top and bottom of the ground.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The homogeneity tests of the load-bearing capacity models performed according to the procedure described in Snedecor & Cochran (1989) indicated homogeneity in some conditions and non-significance of the linear (a) and angular (b) coefficients (Tables 1 and 2). For each one of these conditions the σ_p and θ were grouped and a new equation was then fitted considering all these values, obtaining a single model (Tables 1 and 2 and Figure 1). This non-significance between the models indicates that the conditions analyzed have the same ability to withstand loads. However, in some other conditions the load-bearing capacity models were homogeneous, but the linear (a) and/or angular (b) coefficients differed significantly (Tables 1 and 2 and Figure 1), indicating different load-bearing capacities and because of this σ_p and θ were not grouped.

Table 1 Comparison of load-bearing capacity models for the coffee culture with different establishment times in a Red-Yellow Latosol according to the procedure described in Snedecor & Cochran (1989)

Plot	F	Linear coefficient "a"	Angular coefficient "b"
11B-2 years: 0-3 x 15-18 cm	H	ns	**
6BE-7 years: 0-3 x 15-18 cm	H	ns	*
8B-18 years: 0-3 x 15-18 cm	H	ns	ns
7A-33 years: 0-3 x 15-18 cm	H	ns	ns

H = homogeneous; * significant at 5%; ** significant at 1%; ns = not significant

The load-bearing capacity models were of the type $\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$ (Araujo Junior et al., 2011a), with R^2 significant at 1%. The estimated "a" and "b" values varied from 2.67 to 2.91, and from -0.85 to -2.22, respectively (Figures 1 and 2).

Table 2 Comparison of the load-bearing capacity models for the coffee culture with different establishment times in a Red-Yellow Latosol according to the procedure described in Snedecor & Cochran (1989)

Plot	F	Linear coefficient "a"	Angular coefficient "b"
0-3 cm			
11B-2 years x 6BE-7 years	H	**	**
11B-2 years x 8B-18 years	H	**	*
11B-2 years x 7A-33 years	H	**	**
6BE-7 years x 8B-18 years	H	ns	ns
6BE-7 years and 8B-18 years x 7A-33 years	H	ns	ns
6BE-7 years, 8B-18 years and 7A -33 years x 11B-2 years	H	**	**
15-18 cm			
11B-2 years x 6BE-7 years	H	*	ns
11B-2 years x 8B-18 years	H	*	ns
11B-2 years x 7A-33 years	H	**	**
6BE-7 years x 8B-18 years	H	ns	ns
6BE-7 years and 8B-18 years x 7A-33 years	H	ns	ns
6BE-7 years, 8B-18 years and 7A -33 years x 11B-2 years	H	**	ns

H = homogeneous; * significant at 5%; ** significant at 1%; ns = not significant

The 15-18 cm coffee layer with 2 years of establishment had a higher load-bearing capacity than the 0-3 cm layer for volumetric water content less than $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. For volumetric water content higher than $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, the 0-3 cm layer had higher load-bearing capacity than the 15-18 cm layer (Figure 1a). These results agree with Santos et al. (2010) who found similar results for the position between the rows in a coffee plantation subjected to weed control without weeding in a Red-Yellow Latosol.

The 15-18 cm coffee layer with 7 years of establishment had a higher load-bearing capacity for any volumetric water content than the 0-3 cm layer (Figure 1b). These results agree with Santos et al. (2009) and Araujo Junior et al. (2011a) who found a greater load-bearing capacity for the 10-13 cm layer for the position between the rows in a coffee plantation subjected to weed control without weeding in a Red-Yellow Latosol and in a dystroferric Red Latosol,

respectively. The higher load-bearing capacity indicates a greater resistance to compaction, however, this layer may offers greater resistance to the roots penetration (Araujo Junior et al., 2011b, Miranda et al., 2003a, 2003b).

The 0-3 cm and 15-18 cm coffee layers with 18 and 33 years of establishment (Figures 1c and 1d, respectively) were not statistically different indicating a homogenization of its load-bearing capacity (Miranda et al., 2003a, 2003b) which did not occur with the coffee with 2 and 7 years of establishment. The homogenization of the load-bearing capacities of these layers is indicative of the natural structure recovery 15-18 cm layer in relation to the 0-3 cm layer. These results agree with the results of Araujo Junior et al. (2011a); Miranda et al. (2003b) and Santos et al. (2009).

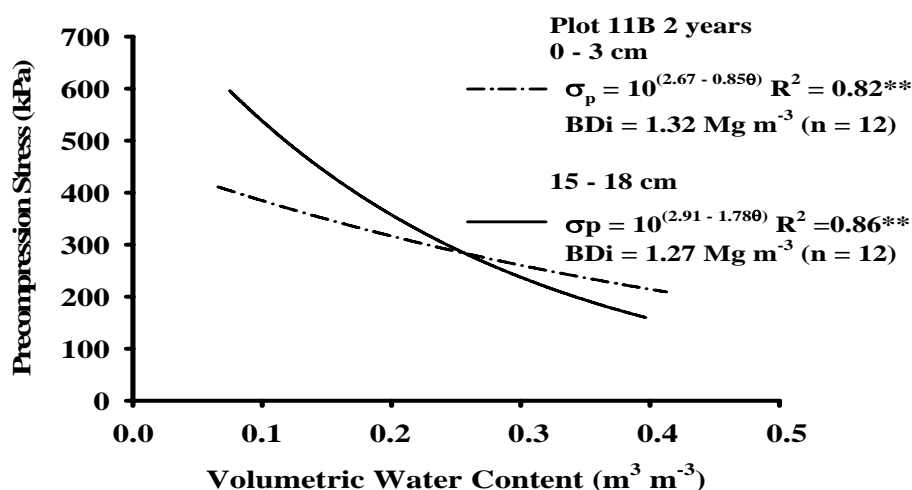


Figure 1a Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 2 years of establishments.

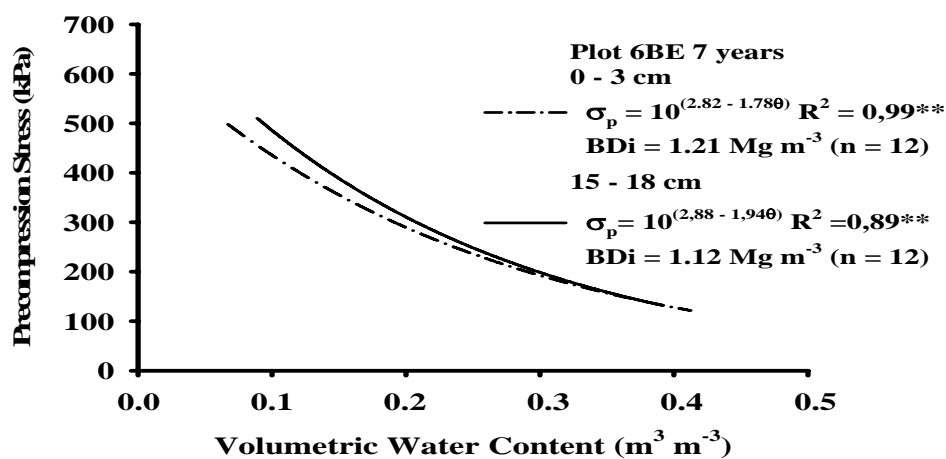


Figure 1b Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 7 years of establishments.

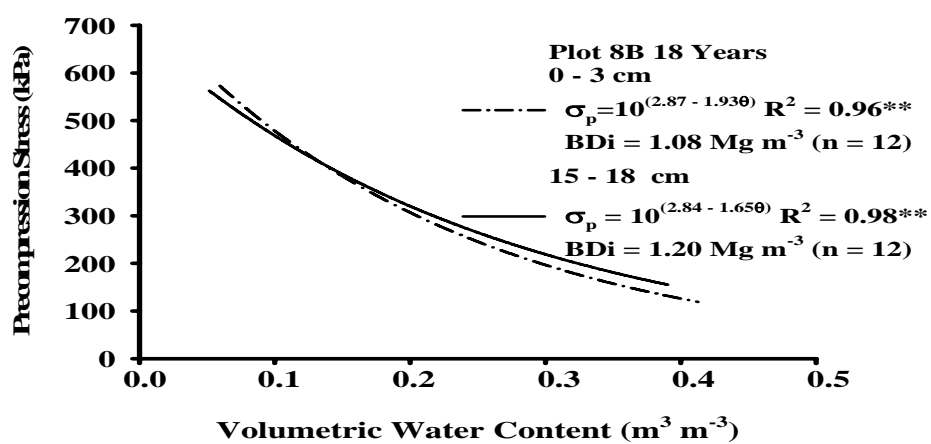


Figure 1c Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 18 years of establishments.

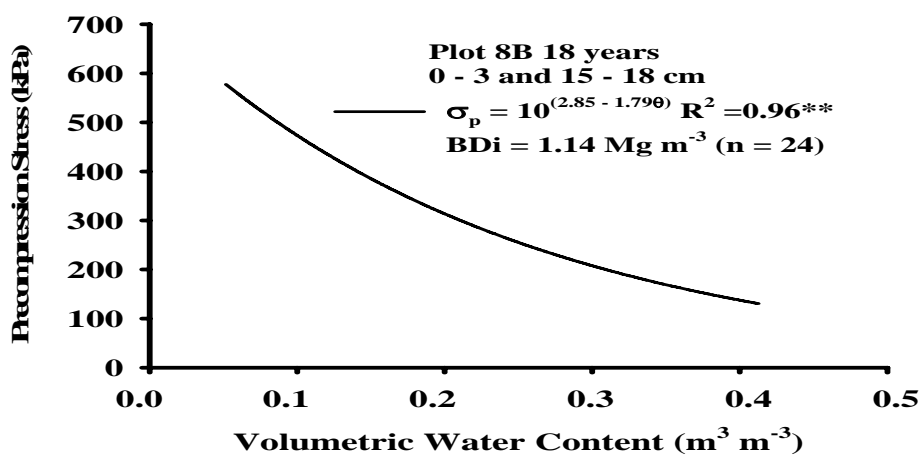


Figure 1d Final load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 18 years of establishments.

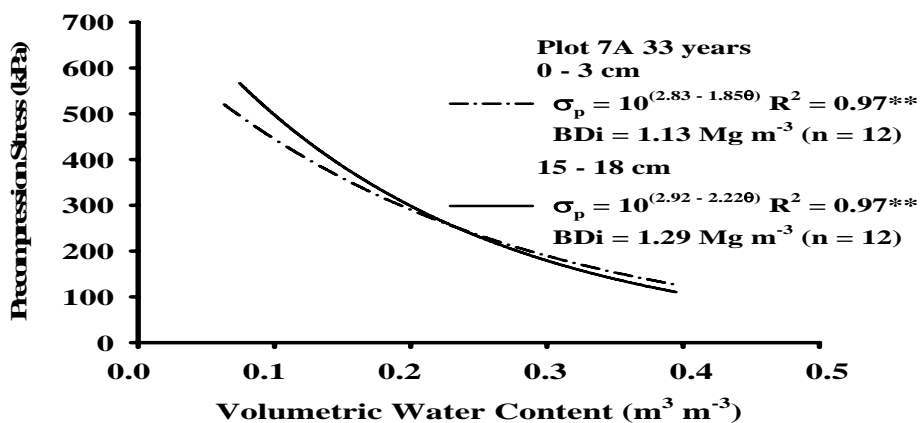


Figure 1e Load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 33 years of establishments.

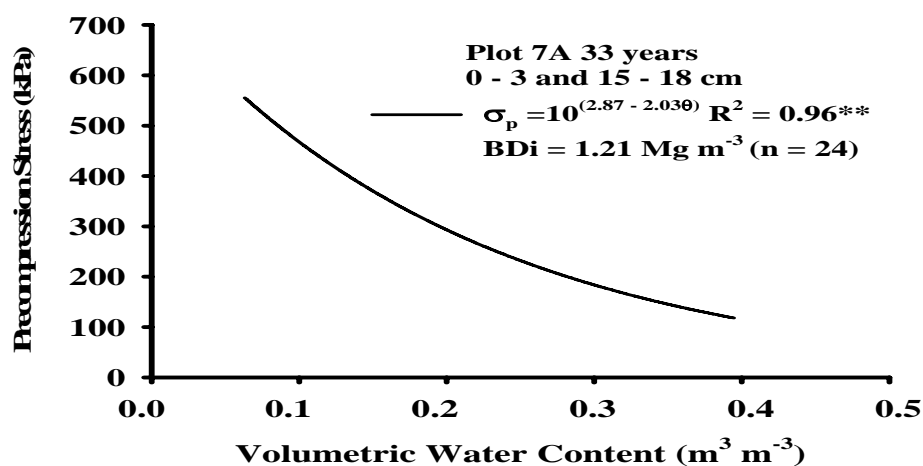


Figure 1f Final load-bearing capacity models of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with 33 years of establishments.

The 0-3 cm coffee layer with 7, 18 and 33 years of establishment had higher load-bearing capacity than the 0-3 cm layer for the coffee with 2 years of establishment for volumetric water content lower than 0.18 m³ m⁻³. For volumetric water content higher than 0.18 m³ m⁻³ the 0-3 cm coffee layer with 2 years of establishment had greater load-bearing capacity than the other coffee plantations (Figure 2).

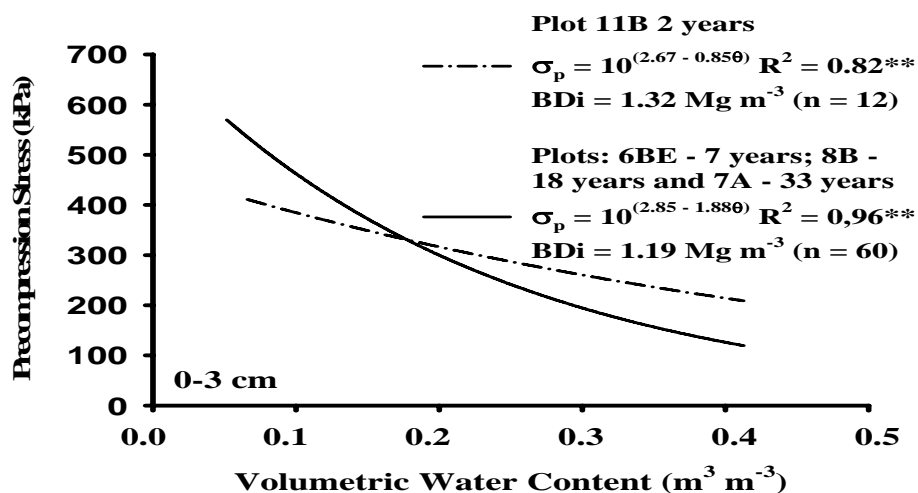


Figure 2 Load-bearing capacity models at 0-3 cm layer of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with different time of establishments.

The 15-18 cm coffee layer with 7, 18 and 33 years of establishment showed a lower load-bearing capacity for any volumetric water content than the 0-3 cm coffee layer with 2 years of establishment (Figure 3). These results agree with the results obtained by Miranda et al. (2003a) who found for a Red Latosol cultivated with coffee that the coffee plants with longer establishment time had, in generally, lower load-bearing capacity. A lower load-bearing capacity indicates that the soil is more susceptible to soil compaction and less restrictive to the root system development (Araujo Junior et al., 2008; Santos et al., 2009, 2010; Araujo Junior et al., 2011a, 2011b).

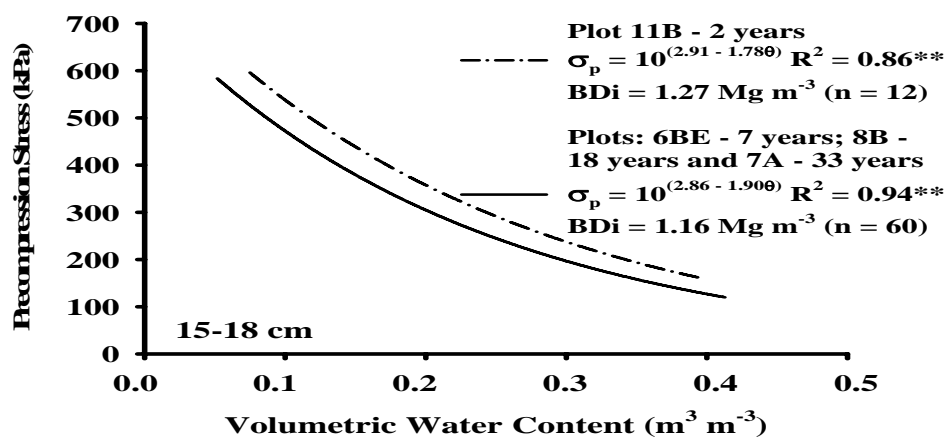


Figure 3 Load-bearing capacity models at 15-18 cm layer of a Red-Yellow Latosol, for the position between the rows, for the coffee plots with different time of establishments.

The 0-3 cm coffee layer with 2, 7, 18 and 33 years of establishment experienced higher compaction than the 15-18 cm layer (Table 3). These results agree with the results obtained by Dias Junior et al. (2008) who found more compaction caused by the mechanical operations in the 0-3 cm layer. However, these results disagree with the results obtained by Santos et al. (2010) and Araujo Junior et al. (2011a, 2011b) who found higher compaction in the 10-13 cm layer than in the 0-3 cm layer. Moreover, Silva et al. (2011) did not found a specific layer where soil compaction had occurred; therefore the results obtained by this researcher either indicated greater compaction in the 0-3 cm layer or in the 10-13 cm layer. Therefore, the results in the literature do not permit to infer in which soil layer the compaction will occur demonstrating, therefore the importance of conducting studies for each specific condition and showing the limitation over generalization in the soil compaction studies.

Table 3 Percentage of compacted soil samples caused by mechanized operations on a Red-Yellow Latosol in the 0-3 and 15-18 cm layers according to the criteria proposed by Dias Junior et al. (2005)

Plot	Traffic line	% of compacted soil samples
0-3 cm		
11B-2 years	top	10
	bottom	10
6BE-7 years	top	60
	bottom	100
8B-18 years	top	70
	bottom	70
7A-33 years	top	50
	bottom	100
15-18 cm		
11B-2 years	top	0
	bottom	0
6BE-7 years	top	0
	bottom	10
8B-18 years	top	10
	bottom	40
7A-33 years	top	50
	bottom	80

The compaction that occurred on the traffic line located at the bottom of the slope was equal or greater than the compaction that occurred in the traffic line located at the top of the slope (Table 3). The lower compaction that occurred in the 0-3 cm and in the 15-18 cm layers of the coffee with 2 years of establishment was due to the higher load-bearing capacity of the 0-3 cm layer for volumetric water content higher than $0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and in any volumetric water content for the 15-18 cm layer compared with the others establishment times used in this study (Figure 2). These results suggest that in future studies of soil compaction conducted in regions with different slopes, one should consider separately the traffic lines located at the top and bottom of the slope to better quantify the compaction effects in the soil structure.

4 CONCLUSIONS

The use of the load-bearing capacity models allowed the coffee plantation identification with 7, 18 and 33 years of establishment as the most susceptible to compaction for volumetric water content lower than $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for the layer of 0-3 cm and at any volumetric moisture content for the layer of 15-18 cm. The coffee plantation with 2 years of establishment was the most resistant to compaction for volumetric moisture content higher than $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for the layer of 0-3 cm and at any volumetric moisture content for the layer of 15-18 cm. The no statistical difference between the load-bearing capacity models for the establishment times of 7, 18 and 33 years of the coffee plantations in the layers 0-3 and 15-18 cm is indicative of the equilibrium of the bearing capacity of the soil structure. The compaction of the traffic line located at the bottom of the ground was equal to or greater than the compaction in the traffic line located at the top of the ground.

REFERENCES

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T.T.S.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian latosols. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p. 122-127, Sept. 2009.

ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. **Mercados e perspectivas do café**. São Paulo: FNP, 2011. p. 192-210.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011a.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 499-513, jul./set. 2011b.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B.S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da indústria de café no Brasil – 2009**. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 16 out. 2010.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1986. 218 p.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. 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**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, jan./mar. 1996.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Assessment of the soil compaction of two ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2245-2253, Nov./Dec. 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Atributos físico-hídricos de um latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Histórico**. Disponível em <<http://www.iac.sp.gov.br/UniPesquisa/Cafe/Historico.asp>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

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, MG, v. 23, n. 3, p. 497-506, jul./set. 1999.

MIRANDA, E. É. V.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PINTO, J. A. O.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; LASMAR JÚNIOR, E. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um latossolo vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, p. 1506-1515, dez. 2003a. Edição Especial.

MIRANDA, E. É. V.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PINTO, J. A. O.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Modelos de sustentabilidade da estrutura de um latossolo vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, p.1546-1553, dez. 2003b. Edição Especial.

ORMOND, J. G. P.; PAULA, S. R. L.; FAVERET FILHO, P. F. **Café: (Re)conquista dos mercados**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 1999. 56 p.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; PAIS, P. A. M. Weed management and its influence on the load bearing capacity of red-yellow latosol under the crown projection in coffee culture. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 2, p. 165-177, July/Dec. 2009.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PAIS, P. A. M. Suscetibilidade à compactação de um latossolo vermelho-amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras, na cultura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 123-136, maio/ago. 2010.

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, MG, v. 35, n. 3, p. 547-554, maio/jun. 2011.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley & Sons, 1948. 700 p.