



MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**EFEITO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA
FLORESTAL NA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

LAVRAS – MG

2014

MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**EFEITO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL NA
COMPACTAÇÃO DO SOLO**

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

Orientador

Dr. Moacir de Souza Dias Junior

**LAVRAS – MG
2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Andrade, Maria Luiza de Carvalho.

Efeito do maquinário de colheita florestal na compactação do solo / Maria Luiza de Carvalho Andrade. – Lavras : UFLA, 2014.
84 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.
Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.
Bibliografia.

1. Compressão uniaxial. 2. Estrutura do solo. 3. Pressão de pré-consolidação. 4. Curva de compressão do solo. 5. Eucalipto. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.4

MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**EFEITO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL NA
COMPACTAÇÃO DO SOLO**

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

APROVADA em 27 de Fevereiro de 2014.

Dr. Mozart Martins Ferreira UFLA

Dr. Wellington Willian Rocha UFVJM

Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2014**

Ao meu pai Jaime

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus, o dom da vida!

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, a oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor, Dr. Moacir de Souza Dias Junior, a orientação, ensinamentos, amizade e confiança ao longo dos anos de trabalho.

Ao Prof., Dr. Mozart Martins Ferreira, a participação na banca, as sugestões e ensinamentos favorecendo o trabalho.

Ao Prof., Dr. Wellington Willian Rocha, a participação na banca, as correções e sugestões que aprimoraram o trabalho.

Ao Ricardo Previdente Martins – Suzano Papel e Celulose – toda ajuda, disponibilidade e dedicação ao trabalho.

À Suzano Papel e Celulose, o financiamento do projeto.

Ao CNPq, a concessão da bolsa de estudos.

À FAPEMIG e a CAPES, o apoio financeiro.

Aos professores do DCS/UFLA, o conhecimento transmitido, auxílio e contribuição ao trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Doroteo, a amizade e ajuda constante.

Aos colegas da pós-graduação, o convívio, amizade e companheirismo.

Aos funcionários do DCS, principalmente à Dirce, a amizade, apoio e dedicação.

Ao meu pai Jaime, meus irmãos Felipe e Moisés, o apoio, incentivo e amor.

Ao meu companheiro, Alexandre, a paciência, amor e a presença constante.

A todos que contribuíram para a realização deste sonho!

RESUMO

Este estudo foi realizado com os objetivos de: i) desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para os horizontes BA e B das seguintes classes de solo: Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4), e identificar as classes e horizontes mais resistentes e mais suscetíveis à compactação; ii) determinar os impactos causados pelas operações de colheita florestal, realizadas com o modal Havester e Forwarder (HV e FW) e; com o sistema alternativo de colheita florestal, composto por: Feller Buncher, Skidder, Flail, Power Clamp e Garra Traçadora, nos horizontes BA e B das seguintes classes de solo: PA09, PA 11 e P4. O estudo foi realizado em Teixeira de Freitas-BA em áreas comerciais da Suzano Papel e Celulose. Para os MCSC foram coletadas 15 amostras indeformadas, totalizando 120 amostras. No modal HV e FW, para avaliar a compactação promovida pelo HV, 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras; para o FW, na condição fora do resíduo, 3 amostras indeformadas foram coletadas para cada passada, totalizando 72 amostras e, finalmente, para avaliar o efeito do resíduo 2 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 48 amostras. No sistema alternativo de colheita, para o Feller Buncher, 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras. Para os diferentes números de passadas do Skidder, 5 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 120 amostras. Para os diferentes apoios do Flail 1 amostra indeformada foi coletada, totalizando 108 amostras. Para o Power Clamp, 5 amostras indeformadas foram coletadas, para o PA11 e P4, totalizando 20 amostras e 3 amostras, para o PA09, totalizando 6 amostras e, finalmente, para a Garra Traçadora 5 amostras indeformadas foram coletadas, para o PA11 e P4, totalizando 20 amostras e 7 amostras, para o PA09, totalizando 14 amostras. Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. O horizonte B apresentou-se, em geral, mais resistente à compactação. No horizonte BA, a classe de solo mais suscetível à compactação foi o PA09. Para o horizonte B a classe de solo mais resistente à compactação foi PA07. No modal HV e FW, o tráfego do HV promoveu maior degradação da estrutura do P4 em ambos os horizontes. Ocorreram incrementos na compactação dos solos com o aumento do número de passadas do FW e o resíduo florestal teve efeito minimizador na compactação do solo. No sistema alternativo de colheita, as operações mecanizadas promoveram maior compactação nos horizontes BA. A classe de solo que mais sofreu compactação foi o PA09.

Palavras-chave: Compressão uniaxial. Estrutura do solo. Pressão de pré-consolidação. Curva de compressão do solo. Eucalipto.

ABSTRACT

This study was performed with the objectives of: i) to develop the bearing capacity models (BCM) for the BA and B horizons of the following soil classes: Yellow Argisol (PA07), Yellow Argisol (PA 09 – with mottle), Yellow Argisol (PA11) and Spodosol (P4), and identify the classes and horizons more resistant and more susceptible to compaction; ii) to determine the impacts caused by the forest harvesting operations, performed with the Harvester and Forwarder modal (HV and FW) and; with the alternative system of forest harvesting, comprised by Feller Buncher, Skidder, Flail, Power Clamp and Tracing Claw, on the BA and B horizons of the following soil classes: PA09, PA11 and P4. The study was performed in Teixeira de Freitas county, BA, Brazil, in commercial areas owned by Suzano Papel e Celulose. For the BCM, 15 undisturbed soil samples were collected, totalizing 120 samples. On the HV and FW modal, to evaluate the compaction promoted by the HV, 15 undisturbed soil samples were collected, totalizing 90 samples; for the FW, in the condition outside the residue, 3 undisturbed soil samples were collected for each pass, totalizing 72 samples and, finally, to evaluate the effect of the residue, 2 undisturbed soil samples were collected, totalizing 48 samples. In the alternative harvesting system, for the Feller Buncher, 15 undisturbed soil samples were collected, totalizing 120 samples. For the different Flail supports, 1 undisturbed soil sample was collected, totalizing 108 samples. For the Power Clamp, 5 undisturbed soil samples were collected, for the PA11 and P4, totalizing 20 samples and 7 samples for PA 09, totalizing 14 samples. All soil samples were submitted to the uniaxial compression test. The B horizon was, in general, more resistant to compaction. For BA horizon, the soil class most susceptible to compaction was PA09. For B horizon, the soil class most resistant to compaction was PA07. In the HV and FW modal, the traffic of the HV promoted higher degradation of the P4 structure in both horizons. Increments in soil compaction occurred with the increase in the number of passes of the FW, and the forest residue minimized the effect in the soil compaction. In the alternative harvesting system, the mechanized operations promoted higher compaction on the BA horizons. The soil class which most suffered compaction was the PA09.

Keywords: Uniaxial compression. Soil structure. Precompression stress. Soil compression curve. Eucalyptus.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	A cultura do eucalipto e o setor de papel e celulose no Brasil.....	11
2.2	Compactação do solo.....	12
	REFERÊNCIAS.....	16
	SEGUNDA PARTE– ARTIGOS	22
	ARTIGO 1 MODELAGEM DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTOS	22
	ARTIGO 2 IMPACTOS CAUSADOS SOBRE A ESTRUTURA DOS SOLOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL REALIZADAS NO SISTEMA DE TORAS CURTAS (Cut-to-Length).....	42
	ARTIGO 3 IMPACTOS CAUSADOS SOBRE A ESTRUTURA DOS SOLOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL UTILIZANDO SISTEMA MISTO COM DESCASCAMENTO COM EQUIPAMENTO FLAIL.....	59
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O setor de celulose e papel contribui com uma parcela importante para a economia brasileira. Em 2012, o valor de suas exportações foi igual a US\$ 6,7 bilhões, proporcionando a manutenção de mais de 750 mil empregos diretos e indiretos e o pagamento de 3,5 bilhões de impostos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA, 2011).

O Brasil destaca-se entre os maiores produtores mundiais de celulose e papel. Esta notoriedade está associada à alta produtividade das florestas plantadas de eucalipto, que advém das condições locais favoráveis de clima e solo e dos investimentos em melhoramento genético e em tecnologia de silvicultura (ANUÁRIO..., 2012).

Em virtude da crescente demanda no setor de papel e celulose, à posição de destaque do Brasil no cenário mundial e às exigências de mercado, é fundamental que a sustentabilidade faça parte da estratégia das empresas de exploração florestal em todo o ciclo de produção. Contudo, com a intensificação das operações de colheita florestal mecanizada, iniciada na década de 1990, as empresas brasileiras adotaram um sistema de colheita totalmente mecanizado em substituição à colheita manual ou semimecanizada (LEONELLO; GONCALVES; FENNER, 2012), comprometendo a sustentabilidade do solo, uma vez que essas operações envolvem o tráfego intenso e pesado de máquinas sobre o solo podendo causar a compactação.

A compactação do solo é o principal processo de degradação da estrutura do solo (DIAS JUNIOR et al., 2007; PAGLIAI, 2007) e, apesar de em estudos serem apontados que os efeitos das operações de colheita florestal

podem ser identificados pelas propriedades físicas do solo como: densidade do solo, porosidade e resistência à penetração (LOPES et al., 2006, 2011), nenhuma dessas propriedades quantifica os níveis de pressões que podem ser aplicadas aos solos sem que haja degradação de sua estrutura.

A preservação da estrutura do solo está relacionada com a sua capacidade de suporte de carga, que é definida como a capacidade da estrutura do solo em resistir tensões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo (ALAKUKKU et al., 2003).

Uma propriedade do solo indicadora da capacidade de suporte de carga é a pressão de pré-consolidação, que tem sido utilizada para estimar, quantitativamente, o risco de compactação do solo (ALAKUKKU et al., 2003). No modelo de capacidade de suporte de carga, desenvolvido por Dias Junior (1994), a pressão de pré-consolidação é expressa em função de diferentes umidades, indicando, portanto, a máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes condições de umidade, sem sofrer compactação adicional, evitando prejuízos nas produções dos solos ao longo do tempo (DIAS JUNIOR et al., 2007).

Com a finalidade de alcançar um sistema produtivo sustentável, principalmente, no que se refere à colheita florestal, é imprescindível a avaliação e monitoramento dos atributos físicos e mecânicos do solo, a fim de mitigar a degradação estrutural, pela utilização dos modelos de capacidade de suporte de carga dos solos, por ser uma ferramenta preventiva à compactação do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do eucalipto e o setor de papel e celulose no Brasil

O eucalipto foi introduzido no Brasil no ano de 1868, com as primeiras mudas plantadas no Rio Grande do Sul. No ano de 1909, iniciou-se o plantio do eucalipto em escala comercial por meio da Companhia Paulista de Estradas de Ferro – CPEF. A princípio, os desbastes em eucalipto estavam destinados a suprir a demanda diversificada da madeira, a começar pelo uso da lenha para combustíveis das locomotivas, bem como a produção de mourões de cercas e postes margeando a ferrovia, além do fornecimento da madeira para a construção das estações e vilas (MOURA; GARCIA, 2000).

Em 1852 foi instalada no Brasil a primeira fábrica de papel. No decorrer dos anos, o aumento da produção de papel em resposta à ampliação do mercado consumidor, aumentou, proporcionalmente, a demanda por celulose, iniciando, assim, a implantação de fábricas de celulose. A partir de 1954, com aperfeiçoamento do processo de fabricação de papel, passou-se a utilizar, totalmente, a celulose de eucalipto na fabricação de papel (LOPES; CONTADOR, 1998).

A partir de meados dos anos 1960, o governo adotou uma intensa política de incentivo fiscal ao florestamento e ao reflorestamento, voltada para indústrias moveleiras e de papel e celulose, intensificando a plantação de florestas em diversas regiões do Brasil, incluindo florestas de eucalipto (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010; MOURA; GARCIA, 2000).

O setor brasileiro de celulose e papel detém as florestas plantadas mais produtivas do mundo (BRACELPA, 2011). Do total de madeira de florestas

plantadas produzida no Brasil, em 2012, 35,2% foi empregada na produção de celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

O Brasil é, atualmente, o terceiro e o nono maior produtor mundial de celulose e papel, respectivamente. Em 2012, a produção de papel totalizou 10,0 milhões de toneladas e as exportações somaram, aproximadamente, USD 2,0 bilhões. Já a produção de celulose totalizou 13,9 milhões de toneladas e as exportações somaram, aproximadamente, USD 4,7 bilhões (ABRAF, 2013). Esses dados evidenciam a importância atual do setor de papel e celulose na economia do país e esta importância tende a perdurar, uma vez que a projeção de exportação de 2011/2012 a 2021/2022 é de um acréscimo de 40,1% na exportação da celulose e de 18,4% na exportação de papel (BRASIL, 2012).

A expectativa de crescimento do setor de papel e celulose e a perspectiva de ampliação da área de florestas plantadas (BRACELPA, 2011) lançam o desafio de preservar as áreas já cultivadas, bem como as que virão a ser florestadas pelo manejo sustentável. Neste contexto, os investimentos em estudos e o emprego de metodologias que possibilitem aperfeiçoar o uso dos solos são indispensáveis e muito demandados atualmente, já que o solo é um recurso natural não renovável e insubstituível.

2.2 Compactação do solo

O principal tipo de degradação da estrutura do solo é a compactação, que é resultado de um processo de estresse mecânico, que se caracteriza pelo decréscimo em volume e acréscimo de densidade, pela expulsão do ar dos poros do solo (MAGALHÃES; MOLIN; FAULIN, 2004). Gupta e Allmaras (1987) descrevem esse processo como sendo a compressão do solo em estado não

saturado, durante a qual ocorre aumento da densidade em consequência da redução de seu volume.

O desmatamento, o pastejo e o preparo excessivo do solo, as práticas de manejos inadequadas, áreas inaptas para culturas anuais e chuvas de alta intensidade são os principais agentes físicos de degradação do solo (MARTINS, 2009).

Além de reduzir o rendimento das culturas, a compactação do solo pode provocar danos ambientais, expondo o solo aos agentes erosivos, resultando na sua desestruturação e perda da capacidade de absorção de água (PIRES, 2007).

O processo de compactação é influenciado por fatores externos (LEBERT; HORN, 1991), evidenciando-se o tipo, a intensidade e frequência de carga aplicada pelas máquinas agrícolas (CASTRO NETO, 2001) e por fatores internos, destacando-se a história de tensão (DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; REINERT, 1990), umidade do solo (DIAS JUNIOR, 1994; SILVA et al., 2000), textura, estrutura e densidade inicial do solo (DIAS JUNIOR, 1994; GUPTA; HADAS; SCHAFER, 1989; LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; SILVA et al., 2000) e teor de carbono do solo (ASSOULINE; TAVARES-FILHO; TESSIER, 1997; ETANA; COMIA; HAKANSON, 1997; SOANE, 1990).

A preservação da estrutura do solo está associada com a sua capacidade de suporte de carga e suas alterações podem ser simuladas por meio da curva de compressão do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; LARSON et al., 1989; LARSON; GUPTA; USECHE, 1980). Esta curva representa, graficamente, a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (CASAGRANDE, 1936; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; HORTZ; KOVACS, 1981; KONDO, 1998).

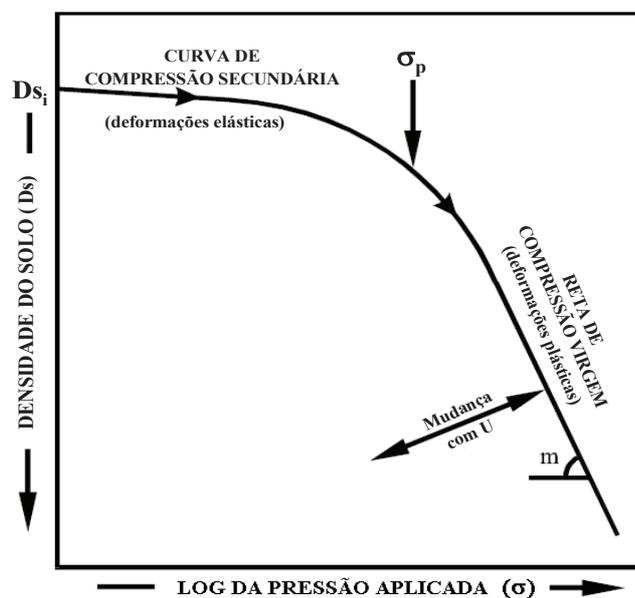


Figura 1 Curva de compressão do solo
 Fonte: Adaptado de Dias Junior (1994)

Com o intuito de avaliar a capacidade de suporte de carga de solos parcialmente saturados, o ensaio de compressão uniaxial tem sido utilizado para obter a pressão de pré-consolidação (σ_p), considerando a curva de compressão (DIAS JUNIOR, 1994; KONDO, 1998, 2003; LIMA, 2004; MIRANDA, 2001; MIRANDA et al., 2003; SILVA, 2003). Quando o solo já sofreu pressão prévia, a curva de compressão do solo apresenta duas regiões, uma de deformações elásticas e recuperáveis e uma de deformações plásticas e não recuperáveis (Figura 1). A pressão de pré-consolidação tem sido utilizada para indicar o ponto de separação entre essas regiões (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995, 1996). No entanto, quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, a curva de compressão do solo é linear (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980).

No modelo de capacidade de suporte de carga, desenvolvido por Dias Junior (1994), a pressão de pré-consolidação é expressa em função de diferentes

umidades, indicando, portanto, a máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes umidades sem sofrer compactação adicional, ou seja, degradação da sua estrutura. Com base nos modelos de capacidade de suporte de carga solo, utilizando os critérios (DIAS JUNIOR et al., 2005) apresentados na figura 2, pode-se determinar os impactos de diferentes manejos na estrutura dos solos (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; DIAS JUNIOR et al., 2005; MARTINS et al., 2013; PAIS et al., 2013; PIRES, 2012).

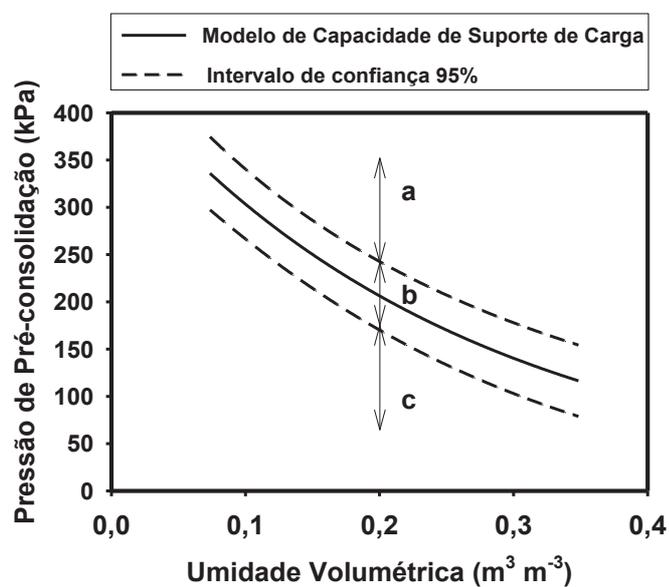


Figura 2 Modelo de capacidade de suporte de carga, segundo critérios adotado por Dias Junior et al. (2005)

Assim, o modelo de capacidade de suporte de carga é subdividido em três regiões (Figura 2):

- Região a: com compactação adicional.

- Região b: sem compactação, mas com tendência a compactar se as pressões aplicadas forem maiores do que as pressões de pré-consolidação do limite superior do intervalo de confiança.

- Região c: sem compactação.

Assim sendo, nas áreas de maior intensidade de mecanização, estas informações têm grande relevância, pois o modelo de capacidade de suporte de carga pode prognosticar quando o solo poderá ser trafegado sem sofrer compactação sendo, portanto, um instrumento indispensável, quando se tem o propósito de adotar medidas preventivas à compactação do solo, além de ser eficaz em determinar os impactos causados quando tais medidas não forem adotadas.

REFERÊNCIAS

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

ANUÁRIO estatístico da agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2012. 284 p.

ARAUJO-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. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório estatístico da BRACELPA 2010-2010**. São Paulo, 2011. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**. Brasília, 2013. 146 p.

ASSOULINE, S.; TAVARES-FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 62, p. 390-398, Mar./Apr. 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio Brasil 2011/12 a 2021/22**. Brasília, 2012. 51 p.

CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load its pactical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGENEERING, 1., 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: MA Harvard University, 1936. p. 60-64.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionado a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

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

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

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, jan./mar. 1996.

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.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish Soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1/2, p. 13-21, Dec. 1997.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1987. p. 65-100.

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

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Rio de Janeiro, 2010. 50 p.

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

KONDO, M. K. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado**. 2003. 166 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

LARSON, W. E. et al. **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. Wageningen: Kluwer Academic, 1989. 273 p. (Nato Applied Science, 172).

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, May/June 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, Feb. 1991.

LEONELLO, E. C.; GONCALVES, S. P.; FENNER, P. T. Efeito do tempo de experiência de operadores de harvester no rendimento operacional. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1129-1133, 2012.

LIMA, C. L. R. de. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 49 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

LOPES, C. R. A.; CONTADOR, C. R. Análise da indústria de papel e celulose no Brasil. In: CONGRESSO DE ADMINISTRAÇÃO, 7., 1998. Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos...** Rio de Janeiro: UFRJ, 1998. Disponível em: <<http://reocities.com/Eureka/enterprises/1900>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

LOPES, S. E. et al. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego de skidder com diferentes rodados. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 3, p. 471-480, 2011.

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.

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

MARTINS, P. C. C. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um cambissolo sob diferentes sistemas de uso da terra na Amazônia Ocidental**. 2009. 38 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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

MIRANDA, E. E. V. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região dos Cerrados**. 2001. 57 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

MIRANDA, E. E. V. et al. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, p. 1506-1515, dez. 2003. Edição especial.

MOURA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p.
PAGLIAI, M. **Soil structure**. Trieste: College on Soil Physics; International Centre for Theoretical Physics, 2007. 27 p.

PAIS, P. S. M. et al. Load-bearing capacity of a red-yellow latosol cultivated with coffee plants subjected to different weed managements. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 2, p. 145-151, mar./abr. 2013.

PIRES, B. S. Modelos de capacidade de suporte de carga de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 635-642, mar./abr. 2012.

PIRES, B. S. **Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um Latossolo sob diferentes usos e manejos**. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 128 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing, 1990.

SILVA, A. R. **Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos impactos causados pelas operações mecanizadas na estrutura de um Latossolo amarelo cultivado com cafeeiros**. 2003. 39 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

SILVA, V. R. et al. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho Escuro e de um Podzólico Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 239-249, abr./jun. 2000.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 179-201, Apr. 1990.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1 MODELAGEM DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE DIFERENTES CLASSES DE SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTOS ⁽¹⁾

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

Maria Luiza de Carvalho Andrade ⁽²⁾, Moacir de Souza Dias Junior ⁽³⁾, Ricardo Previdente Martins ⁽⁴⁾, Paula Cristina Caruana Martins ⁽⁵⁾, Piero Iori ⁽⁶⁾ e Paula Sant' Anna Moreira Pais ⁽⁷⁾.

RESUMO

O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solo é importante para adaptar o manejo das culturas de maneira sustentável. O objetivo deste estudo foi desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para diferentes classes de solo cultivadas com eucaliptos, em função da pressão de pré-consolidação e da umidade volumétrica. O estudo foi conduzido em áreas comerciais pertencentes à Suzano Papel e

⁽¹⁾ Parte da dissertação da primeira autora.

⁽²⁾ Mestranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: andrade.marialuiza@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista CNPq e Pesquisador Mineiro FAPEMIG – Universidade Federal de Lavras - Caixa Postal 3037, CEP 37.200-000, Lavras- MG. E-mail: msouzadj@dcs.ufla.br

⁽⁴⁾ Engenheiro Agrônomo MSc em Agricultura Tropical e Subtropical- Divisão de Tecnologia Florestal – UNF/BA - Suzano Papel e Celulose. E-mail: rpmartins@suzano.com

⁽⁵⁾ Bolsista de Pós-doutorado - Júnior-PDJ-CNPq - Programa de Pós-graduação em Ciência do solo – DCS-UFLA. E-mail: pccaruana@hotmail.com

⁽⁶⁾ Professor substituto da Universidade Estadual Paulista – UNESP - Campus Experimental de Registro – SP. E-mail: pieroiori@hotmail.com

⁽⁷⁾ Doutoranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: paulaufla@yahoo.com.br

Celulose, situada no município de Teixeira de Freitas-BA. Foram avaliadas quatro classes de solos: Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodosolo (P4). Todas as classes foram cultivadas com eucaliptos *E. grandis* x *E. urophylla*. Para obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, 15 amostras indeformadas por horizonte e por classe de solo, totalizando 120 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 4 classes de solo). As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro interno por 2,54 cm de altura e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload. O horizonte B apresentou-se, em geral, mais resistente à compactação, enquanto que o horizonte BA mostrou-se mais suscetível à compactação. Para o horizonte BA a classe de solo mais suscetível à compactação foi o PA09, apresentando menor capacidade de suporte de carga do que as demais classes de solo. Para o horizonte B a classe de solo mais resistente à compactação foi PA07.

Termos de indexação: Eucalipto. Compactação do solo. Sustentabilidade. Pressão de pré-consolidação. Estrutura do solo.

MODELING OF LOAD SUPPORT CAPACITY OF DIFFERENT SOIL CLASSES CULTIVATED WITH EUCALYPTUS

ABSTRACT

The use of the bearing capacity models of the different classes of soil is important in order to adapt culture management in a sustainable way. The objective of this study was to develop bearing capacity models for different soil

classes cultivated with eucalyptus, in function of the precompression stress and volumetric water content. The study was conducted in commercial areas owned by Suzano Papel e Celulose, located in Teixeira de Freitas count, BA, Brazil. Four soil classes were evaluated: Yellow Argisol (PA07), Yellow Argisol (PA09), Yellow Argisol (PA11) and Spodosol (P4). All classes were cultivated with eucalyptus *E. grandis* x *E. urophylla*. In order to obtain the bearing capacity models, 15 undisturbed soil samples were randomly collected by horizon and by soil class, totalizing 120 samples (15 samples x 2 horizons x 4 soil classes). The undisturbed soil samples were collected using a Uhland sampler with volumetric ring of 6.40 cm of internal diameter by 2.54 cm of height and submitted to uniaxial compression test using a consolidometer of the Durham Geo Slope® brand model S-450 Terraload. The B Horizon was, in general, more resistant to compaction, while the BA horizon was more susceptible to compaction. For the BA horizon the soil class most susceptible to compaction was PA09, presenting lower bearing capacity than the others soil classes. For the B horizon the soil class most resistant to compaction was PA07.

Indexation terms: Eucalyptus. Soil compaction. Sustainability. Precompression stress. Soil structure.

INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro o setor de florestas plantadas ocupa uma posição de destaque na economia, contribuindo com a geração de produtos, tributos e empregos. Devido à sua importância e à crescente demanda, o setor florestal necessita de estratégias diferenciadas em todos os seus segmentos para atender às exigências de mercado atual, requerendo que as empresas envolvidas com a

exploração de recursos naturais adequem suas atividades com o desenvolvimento sustentável.

Uma das limitações para que o desenvolvimento em áreas florestadas seja sustentável é a compactação do solo, ocorrendo, principalmente, durante as operações de colheita florestal em razão do tráfego das máquinas de corte, limpeza da árvore e escoamento da produção (DIAS JUNIOR *et al.*, 2003).

Desse modo, associado ao potencial das operações de colheita florestal em promover a compactação do solo, pesquisadores tem utilizado propriedades físicas e mecânicas que não apenas quantifiquem o efeito da compactação sobre a estrutura do solo, mas também estimem os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar que a sua compactação adicional ocorra (MARTINS *et al.*, 2013), como a pressão de pré-consolidação (DIAS JUNIOR *et al.*, 2008; AJAYI *et al.*, 2009).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos solos (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996) indicam a máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes condições de umidade, e tem sido amplamente utilizada, seja para comparar o efeito sobre a estrutura do solo variando manejo do solo (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005; ARAUJO-JUNIOR *et al.*, 2011; PIRES *et al.*, 2012; MARTINS *et al.*, 2013; PAIS *et al.*, 2013) bem como, como um indicador da suscetibilidade do solo à compactação (AJAYI *et al.*, 2010).

Assim, com o intuito de entender como as diferentes classes de solo afetam sua capacidade de suporte de carga, e em consequência a sua resistência à compactação do solo, o objetivo deste estudo foi desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para diferentes classes de solo cultivadas com eucaliptos, em função da pressão de pré-consolidação e da umidade volumétrica e determinar as classes de solo mais resistentes e mais suscetíveis à compactação.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em áreas comerciais pertencentes à Suzano Papel e Celulose, situada no município de Teixeira de Freitas, na região do extremo sul do Estado da Bahia. O município de Teixeira de Freitas está localizado nas coordenadas 17° 32' 27" S de latitude e 39° 44' 25" O de longitude com altitude média de 624 m.

Na região do extremo sul da Bahia as chuvas são bem distribuídas ao decorrer do ano, tendo o período mais intenso de chuvas entre os meses de novembro a janeiro. A pluviosidade média anual está em torno de 1.100mm, com temperaturas entre 23°C e 27°C (COUTO, 2009).

As classes de solos analisadas foram as seguintes: Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4). Todas as classes cultivadas com eucaliptos *E. grandis* x *E. urophylla*.

A amostragem foi realizada no período de janeiro a fevereiro de 2012. Foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, 15 amostras indeformadas por horizonte e por classe de solo, totalizando 120 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 4 classes de solo). As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro interno por 2,54 cm de altura.

Amostras deformadas provenientes do excesso de solo das partes superiores e inferiores dos anéis de amostragem foram submetidas às seguintes análises de caracterização física: textura (DAY, 1986) e densidade de partículas (BLAKE & HARTGE, 1986). Estes resultados são apresentados na Tabela 1.

Para preservar a integridade das amostras indeformadas desde o momento da coleta até a realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório, todas as amostras foram cuidadosamente envoltas em filme plástico e parafinadas no campo.

As simulações das diferentes umidades foram feitas utilizando as amostras indeformadas que foram, inicialmente, saturadas em uma bandeja com água até 2/3 da altura da amostra, por 24 horas, e 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 horizonte e de cada classe de solo. As amostras restantes foram colocadas dentro de um dessecador para secarem ao longo do tempo no laboratório. Os valores de umidades gravimétricas foram multiplicados pelas respectivas densidades do solo (BLAKE & HARTGE, 1986) obtendo-se desta forma os valores de umidades volumétricas.

Tabela 1 Caracterização física do Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4).

Classe de solo	Horizonte	Dp Mg m⁻³	Argila -----	Silte g Kg⁻¹	Areia -----
PA07	BA	2,55 ¹	190 ¹	30 ¹	780 ¹
	Bt	2,56	400	30	570
PA09	BA	2,57	170	10	820
	Bt	2,57	290	50	660
PA11	BA	2,56	120	20	860
	Bt	2,57	200	30	770
P4	BA	2,60	60	20	920
	Bts	2,58	220	40	740

1 = média de 3 repetições; Dp = densidade de partículas

No ensaio de compressão uniaxial foram utilizados consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload, cuja aplicação das pressões se faz através da utilização de ar comprimido. As pressões aplicadas às amostras foram as seguintes: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa. Estas foram aplicadas às amostras até que 90% de sua deformação máxima fossem alcançadas (TAYLOR, 1948; HOLTZ & KOVACS, 1981). Somente após esta condição ter sido alcançada é que se aplicou uma nova pressão.

Após a realização dos ensaios de compressão uniaxial, as pressões de pré-consolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), nas curvas de compressão do solo. A seguir, as pressões de pré-consolidação (σ_p) foram representadas em função das umidades volumétricas (θ) simuladas em laboratório e através do uso do software Sigma Plot 10.0 (Jandel Scientific, San Rafael, CA, USA) foram obtidas as equações matemáticas que correspondem aos modelos de capacidade de suporte de carga de acordo com Dias Junior (1994) $\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$, em que σ_p é a pressão de pré-consolidação, θ a umidade volumétrica do solo, e “a” e “b” os coeficientes de ajuste da regressão.

A comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga foi feita utilizando-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] para os horizontes BA e B das diferentes classes de solo, estão apresentados nas figuras de 1 a 4. Os modelos de capacidade de suporte de carga foram comparados nos horizontes BA e B dentro de cada classe de solo (Tabela 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA e B do PA07, PA09, PA11 e P4, diferiram estatisticamente indicando diferentes capacidades de suporte de cargas (Tabela 2). O horizonte B apresentou, em geral, maior capacidade de suporte de carga do que o horizonte BA, sendo, portanto, mais resistente à compactação e mais restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular, enquanto que o horizonte BA é mais suscetível à compactação e menos restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular. Esses resultados podem estar relacionados com a textura dos solos, já que os teores de areia nos horizontes BA são mais elevados quando comparados aos horizontes B (Tabela 1) corroborando com Ohu *et al.*,(1987) que observaram que solos com classe textural areia-franca são mais susceptíveis à compactação do que os solos franco-arenosos, por possuírem maiores teores de areia.

Tabela 2 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] dos horizontes BA e B para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
PA07	H	**	**
PA09	H	*	*
PA11	H	**	ns
P4	H	ns	*

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; **, * e ns: significativos a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.

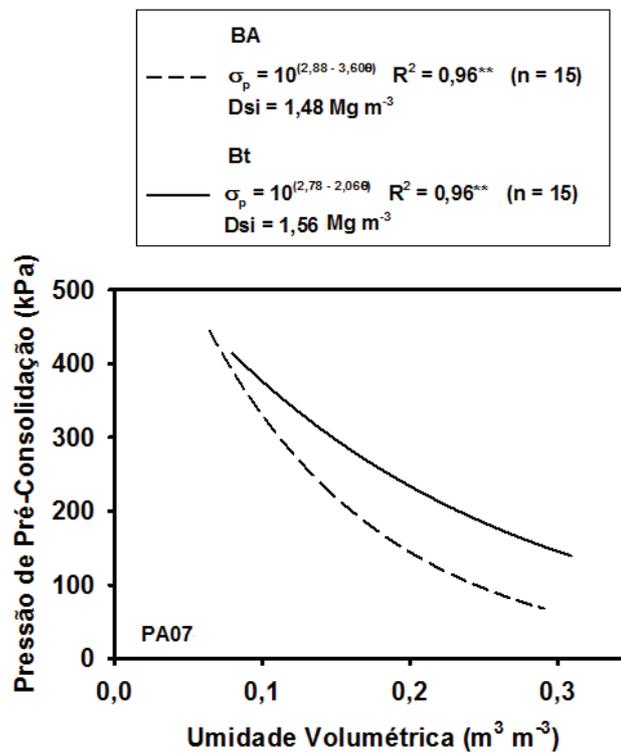


Figura 1 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA07) para os horizontes BA e Bt

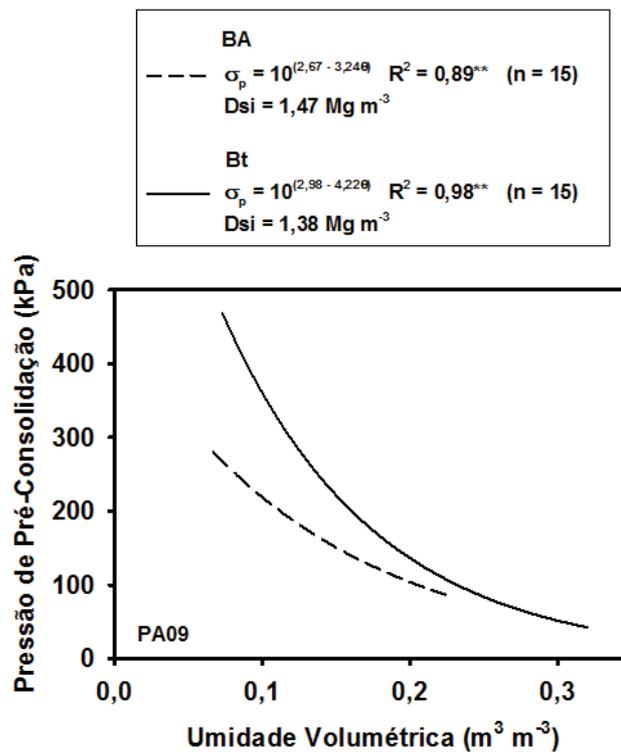


Figura 2 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09) para os horizontes BA e Bt

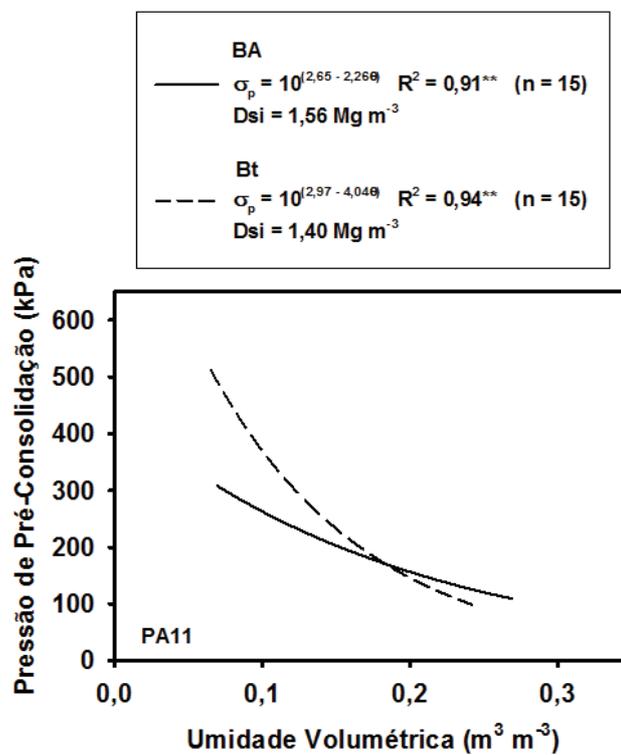


Figura 3 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA11) para os horizontes BA e Bt

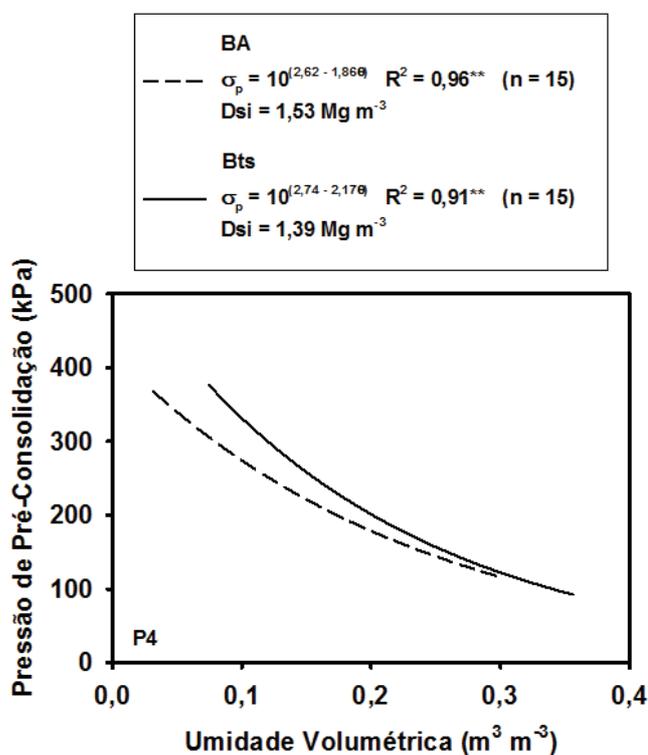


Figura 4 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Espodossolo (P4) para os horizontes BA e Bts

Os modelos de capacidade de suporte de carga das classes de solos nos horizontes BA do PA07, PA09, PA11 e P4, diferiram estatisticamente (Tabela 3) indicando diferentes capacidades de suporte de cargas.

O horizonte BA do PA09 foi o mais suscetível à compactação, pois apresentou menor capacidade de suporte de carga do que as outras classes de solo (Figura 5), isso se deve, provavelmente, à presença de mosqueado neste Argissolo, que é uma característica de solos mal drenados (EMBRAPA, 2006). Segundo Dias Junior (1994) para uma determinada condição, a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é governada pela umidade.

Para umidades volumétricas menores do que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o horizonte BA do PA07 foi o mais resistente à compactação enquanto que o horizonte BA do PA11 foi o mais suscetível, já o horizonte BA do P4 apresentou um comportamento intermediário (Figura 5).

Para umidades volumétricas maiores do que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o horizonte BA da classe de solo P4 foi o mais resistente à compactação enquanto que o horizonte BA do PA07 foi o mais suscetível, já o horizonte BA do PA11 apresentou um comportamento intermediário (Figura 5).

Os resultados distintos quanto à suscetibilidade de compactação nos horizontes BA das diferentes classes de solo, estão associados, provavelmente, à história de tensão induzida pelo manejo que esses solos foram submetidos no passado (DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Tabela 3 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga $[\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}]$ do horizonte BA para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
PA07 x P4	H	**	ns
PA07 x PA09	H	ns	**
PA07 x PA11	H	**	ns
P4 x PA09	H	**	**
P4 x PA11	H	ns	*
PA11 x PA09	H	*	**

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; **, * e ns: significativos a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.

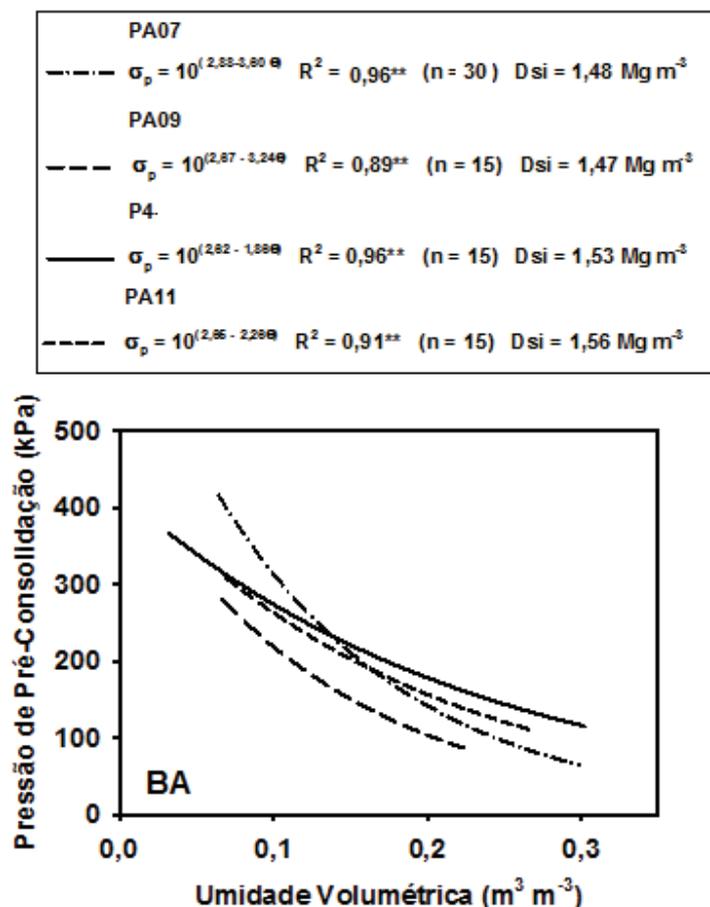


Figura 5 Modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA do Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09), Espodossolo (P4) e Argissolo Amarelo (PA11)

Os modelos de capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solos nos horizontes B do PA07 e P4 diferiram estatisticamente (Tabela 4) indicando diferentes capacidades de suporte de cargas, enquanto que os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do PA09 e PA11 não diferiram estatisticamente (Tabela 4) e, assim, uma nova equação foi obtida, considerando todos os valores de $\sigma_p \times \theta$, e os dois modelos foram agrupados em

um único modelo (Figura 6) indicando capacidades de suporte de cargas iguais. Este novo modelo foi diferente dos modelos dos horizontes B do PA07 e P4 (Tabela 4).

Tabela 4 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga $[\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}]$ do horizonte B para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
PA07 x PA09	NH	**	**
PA09 x P4	H	**	**
PA07 x P4	H	ns	**
PA11 x PA09	H	ns	ns
PA11 e PA09xPA07	H	**	**
PA11 e PA09 x P4	H	**	**

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; NH: não homogêneo; ** e ns: significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

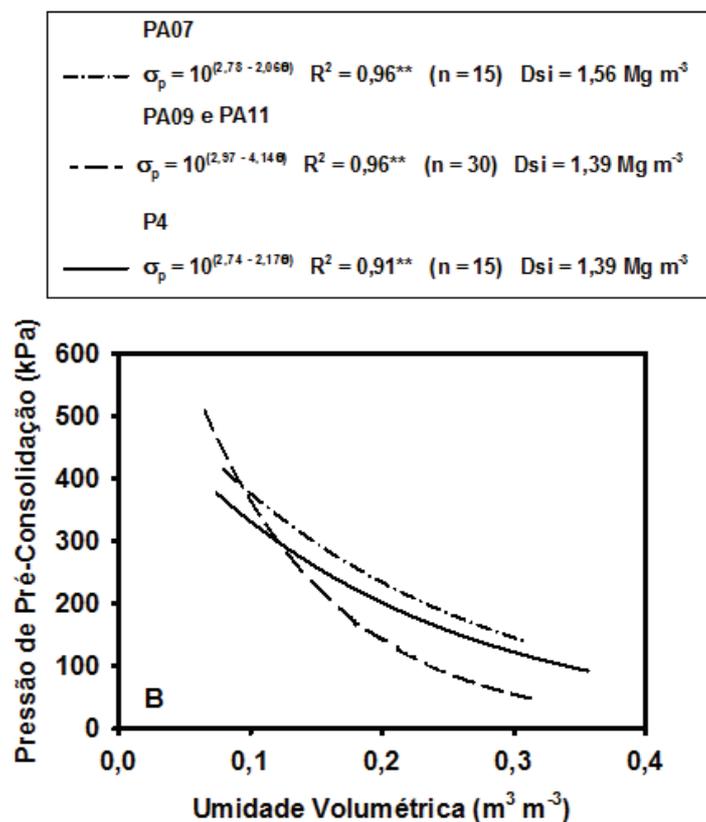


Figura 6 Modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do Argissolo Amarelo (PA07), Argissolo Amarelo (PA09), Espodossolo (P4) e Argissolo Amarelo (PA11)

O horizonte B do PA07 foi o mais resistente à compactação, pois apresentou maior capacidade de suporte de carga do que as outras classes de solo, a maior capacidade de suporte de carga dos solos tem sido atribuída à maior coesão do solo (GONTIJO *et al.*, 2008; SEVERIANO *et al.*, 2010c; OLIVEIRA *et al.*, 2011), o PA07, em função desta maior capacidade de suporte

de carga, pode oferecer maior resistência, em profundidade, ao desenvolvimento do sistema radicular quando comparado às outras classes de solo

As classes de solos PA09 e PA11 apresentaram comportamento intermediário.

Para umidades volumétricas menores do que $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ os horizontes B das classes de solo PA09 e PA11 foram o mais resistente à compactação enquanto que o horizonte B do P4 foi o mais suscetível.

Para umidades volumétricas maiores do que $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o horizonte B do P4 foi o mais resistente à compactação enquanto que os horizontes B do PA07 e PA11 foram os mais suscetíveis.

CONCLUSÕES

O horizonte B apresentou-se, em geral, mais resistente à compactação, enquanto que o horizonte BA mostrou-se mais suscetível à compactação.

No horizonte BA a classe de solo mais suscetível à compactação foi o PA09, apresentando menor capacidade de suporte de carga do que as demais classes de solo.

No horizonte B a classe de solo mais resistente à compactação foi PA07.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG, à CAPES e à SUZANO PAPEL E CELULOSE o apoio financeiro concedido.

LITERATURA CITADA

AJAYI, A.E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil Till. Res.**, 105:122-127, 2009.

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

ARAUJO-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**, 35:115-131, 2011.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 377 - 382.

COUTO, E. A. Diagnóstico estratégico do extremo sul da Bahia. **Revista Eletrônica do CESESB**. Disponível em: <www.cesesb.edu.br/revista.php>. Acesso em: 01 set. 2009.

DAY, P.R. Particle fraction and particle size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 545 - 567.

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

DIAS JUNIOR, M.S. et al. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:2245-2253, 2008.

DIAS JUNIOR, M de S. et al. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, 8:103-114, 2002.

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

DIAS JUNIOR, M. de S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. **Scientia 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, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995

_____. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, jan./mar. 1996.

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. 306p.

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

GONTIJO, I. et al. 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

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

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

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

OHU, J.O. et al. Compaction characteristics of prominent agricultural soil in Borno State of Nigeria. **American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.30, p.1575-1577, 1987.

OLIVEIRA, V.S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, 15:435-442, 2011.

PAIS, P.S.M. et al. Load-bearing capacity of a red-yellow latosol cultivated with coffee plants subjected to different weed managements. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 37, n. 2, p. 145-151, mar./abr., 2013.

PIRES, B.S. Modelos de capacidade de suporte de carga de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:635-642, 2012.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina**, 26:321-344, 2005.

SEVERIANO, E.C.et al. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim tifton 85. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, 14:39-45, 2010.

SEVERIANO, E.C.et al. 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

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

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

ARTIGO 2 IMPACTOS CAUSADOS SOBRE A ESTRUTURA DOS SOLOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL REALIZADAS NO SISTEMA DE TORAS CURTAS (Cut-to-Length) ⁽¹⁾

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

Maria Luiza de Carvalho Andrade⁽²⁾, Moacir de Souza Dias Junior⁽³⁾, Ricardo Previdente Martins⁽⁴⁾, Piero Iori ⁽⁵⁾, Paula Cristina Caruana Martins⁽⁶⁾ e Paula Sant' Anna Moreira Pais⁽⁷⁾

RESUMO

O tráfego intenso de máquinas de colheita e baldeio florestal é considerado a principal atividade que promove degradação da estrutura do solo em áreas florestais, devido à compactação do solo. Os objetivos deste estudo foram: desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para as seguintes classes de solo; Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodosolo (P4) cultivados com eucalipto, e determinar,

⁽¹⁾ Parte da dissertação da primeira autora.

⁽²⁾ Mestranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: andrade.marialuiza@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista CNPq e Pesquisador Mineiro FAPEMIG – Universidade Federal de Lavras - Caixa Postal 3037, CEP 37.200-000, Lavras- MG. E-mail: msouzadj@dcs.ufla.br

⁽⁴⁾ Engenheiro Agrônomo MSc em Agricultura Tropical e Subtropical- Divisão de Tecnologia Florestal – UNF/BA - Suzano Papel e Celulose. E-mail: rpmartins@suzano.com

⁽⁵⁾ Professor substituto da Universidade Estadual Paulista – UNESP - Campus Experimental de Registro – SP. E-mail: pieroiori@hotmail.com

⁽⁶⁾ Bolsista de Pós-doutorado - Júnior-PDJ-CNPq - Programa de Pós-graduação em Ciência do solo – DCS-UFLA. E-mail: pccaruana@hotmail.com

⁽⁷⁾ Doutoranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: paulafla@yahoo.com.br

através do uso destes modelos, os impactos causados pelas operações de colheita florestal realizadas com o modal Harvester e Forwarder nos horizontes BA e B. O estudo foi realizado em áreas comerciais pertencentes à Suzano Papel e Celulose, situadas no município de Teixeira de Freitas-BA. Avaliou-se a compactação causada pelo Harvester, e pelo Forwarder com o aumento do número de passadas nas condições de tráfego realizadas fora e sobre o resíduo. Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga das citadas classes de solo foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, antes das operações de colheita florestal, 15 amostras indeformadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 3 classes de solo). Para avaliar a compactação causada pela operação de derruba das árvores de eucalipto usando o Harvester 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 3 classes de solo x 2 horizontes). Para avaliar a compactação promovida pelo aumento do número de passadas com a máquina de baldeio da madeira, Forwarder, na condição fora do resíduo 3 amostras indeformadas foram coletadas para cada passada totalizando 72 amostras (3 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes) e, finalmente, para avaliar o efeito do resíduo na compactação do solo, 2 amostras indeformadas foram coletadas, em cada horizonte para cada passada do Forwarder totalizando 48 amostras (2 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes). Estas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload. O tráfego do Harvester promoveu maior degradação da estrutura do P4 em ambos os horizontes. Ocorreram incrementos na compactação dos solos com o aumento do número de passadas do Forwarder. O resíduo florestal teve efeito minimizador da compactação do solo promovida pelo Forwarder.

Termos de indexação: Compactação. Sustentabilidade. Pressão de pré-consolidação. Capacidade de suporte de carga. Eucalipto.

IMPACTS CAUSED OVER THE SOIL STRUCTURES BY FOREST HARVESTING PERFORMED IN THE CUT-TO-LENGTH SYSTEM

ABSTRACT

The intense traffic of forest harvesting and transportation machinery is considered the main activity which promotes degradation of the soil structure in forest areas, due to soil compaction. The objectives of this study were: develop bearing capacity models for the following soil classes; Yellow Argisol (PA09 – with mottle), Yellow Argisol (PA11) and Spodosol (P4) cultivated with eucalyptus, and determine, through the use of these models, the impacts caused by forest harvesting operations performed with the Harvester and Forwarder modal on BA and B horizons. This study was performed in commercial areas belonging to Suzano Papel e Celulose, located in Teixeira de Freitas county, BA, Brazil. It was assessed the compaction caused by the Harvester, and, by the Forwarder with the increase in the number of passes for the traffic conditions performed out and over the residue. In order to obtain the bearing capacity models of the mentioned soil classes, 15 undisturbed soil samples were randomly collected, on the top of BA and B horizons, before the forest harvesting operations, totalizing 90 samples (15 samples x 2 horizons x 3 soil classes). To evaluate the compaction caused by eucalyptus harvest operation using the Harvester 15 undisturbed soil samples were collected, totalizing 90 samples (15 samples x 3 soil classes x 2 horizons). To evaluate the compaction promoted by the increase in the number of passes with the wood transport machine, Forwarder, in the condition outside the residue 3 undisturbed soil

samples were collected for each pass totalizing 72 samples (3 samples x 4 passes x 3 soil classes x 2 horizons) and, finally, to evaluate the effect of the residue on the soil compaction, 2 undisturbed soil samples were collected, in each horizon for each pass of the Forwarder totalizing 48 samples (2 samples x 4 passes x 3 soil classes x 2 horizons). These soil samples were submitted to the uniaxial compression test using a consolidometers of the Durham Geo Slope® brand model S-450 Terraload. The Harvester traffic promoted higher degradation of the P4 structure on both horizons. Increments occurred in soil compaction with the increase in the number of passes of the Forwarder. The forest residue had minimizing effect of soil compaction promoted by the Forwarder.

Indexation terms: Compaction. Sustainability. Precompression stress. Load support capacity. Eucalyptus.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o 3º maior produtor mundial de celulose e o 9º maior produtor mundial de papel (ABRAF, 2013). Em 2012, o país consumiu, aproximadamente, 182 milhões de m³ de tora de madeira oriundo de plantios florestais, deste total, 35,2% foi empregado no segmento celulose e papel que se destacou como o principal consumidor (ABRAF, 2013).

Para manter a produção e assegurar o consumo, as empresas brasileiras do segmento de celulose e papel têm adotado inovações tecnológicas visando à alta produtividade de suas florestas sem degradar as áreas já cultivadas, bem como as que virão a ser florestadas, através do manejo sustentável. Contudo, a colheita florestal em grandes áreas requer o aumento da utilização de máquinas (SILVA *et al.*, 2010), que podem aplicar altas pressões sobre o solo (HORN *et*

al., 2004), ocasionando alterações nas suas propriedades físicas e mecânicas, degradando a sua estrutura e resultando em compactação (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005, SILVA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2010). Assim, quando se pretende alcançar uma alta produtividade aliada à preservação ambiental, é fundamental que a qualidade da estrutura do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo seja melhorada e preservada (SECCO *et al.*, 2005; LIBARD & FERNANDES, 2006; PIRES *et al.*, 2012).

A pressão de pré-consolidação pode ser definida como um valor estimado da pressão máxima que um solo suportou no passado (DIAS JUNIOR *et al.*, 2007) e tem sido utilizada como indicador da resistência mecânica do solo e da sua capacidade de suporte de carga e, para estimar quantitativamente o risco de compactação do solo (ALAKUKKU *et al.*, 2003). Desse modo, a utilização da pressão de pré-consolidação e da umidade do solo podem aperfeiçoar as estratégias de manejo minimizando os riscos da compactação adicional do solo e os impactos causados pelas operações motomecanizadas (THEBALDI *et al.*, 2012).

Neste contexto, é importante entender como o tráfego das máquinas de colheita e baldeio florestal afetam a capacidade de suporte de carga dos solos e a sua susceptibilidade à compactação, principalmente quando esse tráfego é feito em condições inadequadas de umidade do solo (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005), visando adaptá-lo de forma adequada para uma maior produtividade das florestas sem causar degradação da estrutura dos solos

Os objetivos deste estudo foram: desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga para as seguintes classes de solo; Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4) cultivados com eucalipto, e determinar através do uso destes modelos os impactos causados pelas operações de colheita florestal no modal Harvester e Forwarder.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido em áreas de operações florestais de colheita, em povoamentos de eucaliptos, situados no município de Teixeira de Freitas-BA pertencentes à Suzano Papel e Celulose, com coordenadas 17° 32' 27" S de latitude e 39° 44' 25" O de longitude e altitude média de 624 m. Na região do extremo sul da Bahia a pluviosidade média anual está em torno de 1.100mm, com temperaturas entre 23°C e 27°C (COUTO, 2009).

As classes de solos analisadas foram as seguintes: Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodosolo (P4).

Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga das citadas classes de solo foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, antes das operações de colheita florestal, 15 amostras indeformadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 3 classes de solo).

A textura (DAY, 1986) e a densidade de partículas (BLAKE & HARTGE, 1986) foram determinadas nas amostras de solo coletadas das porções superiores e inferiores dos anéis de amostragem (Tabela 1).

Tabela 1 Caracterização física do Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4).

Classe de solo	Horizonte	Dp Mg m⁻³	Argila -----	Silte g Kg⁻¹	Areia -----
PA09	BA	2,57 ¹	170 ¹	10 ¹	820 ¹
	Bt	2,57	290	50	660
PA11	BA	2,56	120	20	860
	Bt	2,57	200	30	770
P4	BA	2,60	60	20	920
	Bts	2,58	220	40	740

¹ = média de 3 repetições; Dp = densidade de partículas

As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload, dos quais a aplicação das pressões se faz através da utilização de ar comprimido. Foram plicadas às amostras as seguintes pressões: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa, até que 90% de sua deformação máxima fossem alcançadas (TAYLOR, 1948; HOLTZ & KOVACS, 1981). Somente após esta condição ter sido alcançada é que se aplicou uma nova pressão.

Posteriormente aos ensaios de compressão uniaxial, as pressões de pré-consolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), nas curvas de compressão do solo.

A fim de preservar a estrutura das amostras indeformadas desde o momento da coleta até a ocasião do ensaio de compressão uniaxial no laboratório, todas as amostras foram cuidadosamente envoltas em filme plástico e parafinadas no campo. As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro interno por 2,54 cm de altura.

A comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga foi feita utilizando-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Foi avaliada a compactação causada sobre a estrutura dos solos pela operação de máquinas florestais no sistema de colheita florestal de toras curtas (cut-to-length). Neste modal de colheita, a derrubada, descascamento e traçamento foram realizados pelo Harvester, que é composta por máquina base escavadora (marca JOHN DEER, modelo 200C LC) e cabeçote (marca VALMET, modelo 370E), enquanto a extração da madeira foi realizada com Forwarder, (marca JOHN DEERE, modelo 1710).

Para avaliar a compactação causada sobre a estrutura dos solos pelo Harvester 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 3 classes de solo x 2 horizontes). Para avaliar a compactação promovida com o aumento do número de passadas pela máquina de baldeio da madeira, Forwarder na condição fora do resíduo, 3 amostras indeformadas foram coletadas para cada passada totalizando 72 amostras (3 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes) e, finalmente, para avaliar o efeito do resíduo na compactação do solo, 2 amostras indeformadas foram coletadas, em cada horizonte para cada passada do Forwarder totalizando 48 amostras (2 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes). Estas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial descrito anteriormente, com a umidade na qual as operações foram realizadas. Em seguida, as pressões de pré-consolidação foram obtidas para cada condição especificada anteriormente. As pressões de pré-consolidação foram então representadas nos modelos de capacidade de suporte de carga de cada classe de solo utilizando os critérios (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005) apresentados na figura 1.

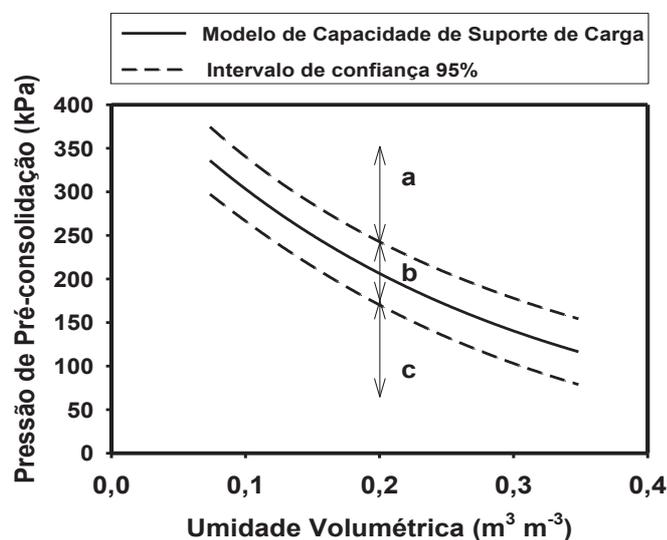


Figura 1 Critérios utilizados na determinação dos impactos das operações de colheita e baldeio florestal sobre a estrutura dos horizontes BA e B do Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4). As regiões “a”, “b” e “c” representam: (a) região onde já ocorreu a compactação do solo, (b) região onde não ocorre a compactação do solo. Esta região indica as amostras que poderão sofrer compactação nas próximas operações de colheita, se as pressões aplicadas forem maiores do que as pressões de pré-consolidação do limite superior de confiança e (c) região onde não ocorre a compactação do solo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA do PA09, PA11 e P4 estão apresentados na figura 2. Os valores dos parâmetros estimados “a” e “b” do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] variaram de 2,62 a 2,67 e de -1,86 a -3,24, respectivamente (Figura 2). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,89 a 0,96, sendo todos significativos a 1 % pelo teste t-Student (Figura 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA das diferentes classes de solo diferiram estatisticamente (Tabela 2) e, devido a isso, apresentaram capacidade de suporte de carga, diferentes (Figura 2).

Tabela 2 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] dos horizontes BA e B para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Horizonte BA			
PA09 x P4	H	**	**
PA11 x PA09	H	*	**
PA11 x P4	H	ns	*
Horizonte B			
PA11 x PA09	H	ns	ns
PA11 e PA09 x P4	H	**	**

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; **, * e ns: significativos a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.

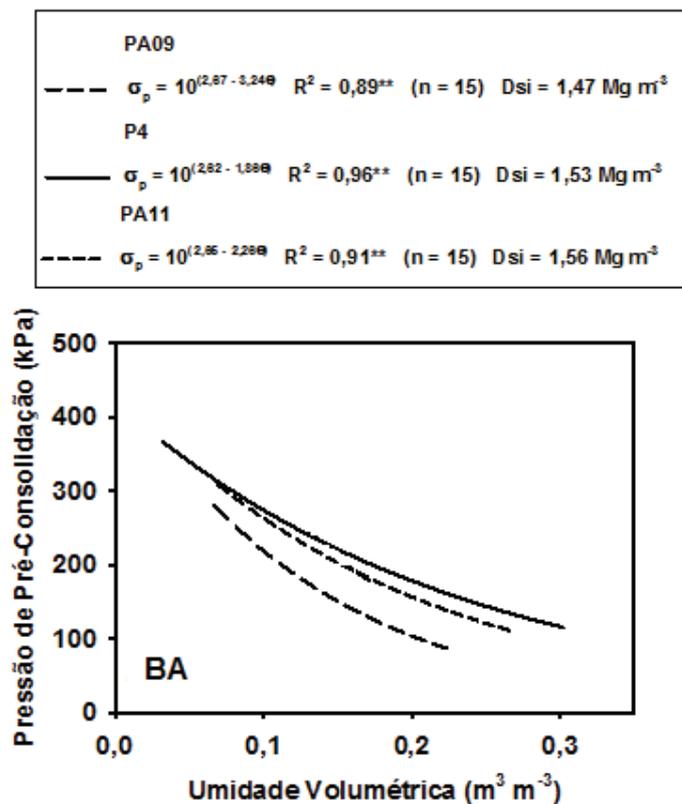


Figura 2 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09), Espodosolo (P4) e Argissolo Amarelo (PA11) para os horizontes BA

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do PA09 e PA11 não diferiram estatisticamente (Tabela 2) e, assim, uma nova equação foi obtida, considerando todos os valores de $\sigma_p \times \theta$, e os dois modelos foram agrupados em um único modelo (Figura 3) indicando capacidades de suporte de cargas iguais. Este novo modelo diferiu estatisticamente do modelo do horizonte B do P4 (Tabela 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do PA09 x PA11 e P4 estão apresentados na figura 3. Os valores dos parâmetros estimados “a” e “b” do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] variaram de 2,74 a 2,97 e de -2,17 a -4,14 respectivamente (Figura 3). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,91 a 0,96, sendo significativos a 1 % (Figura 3).

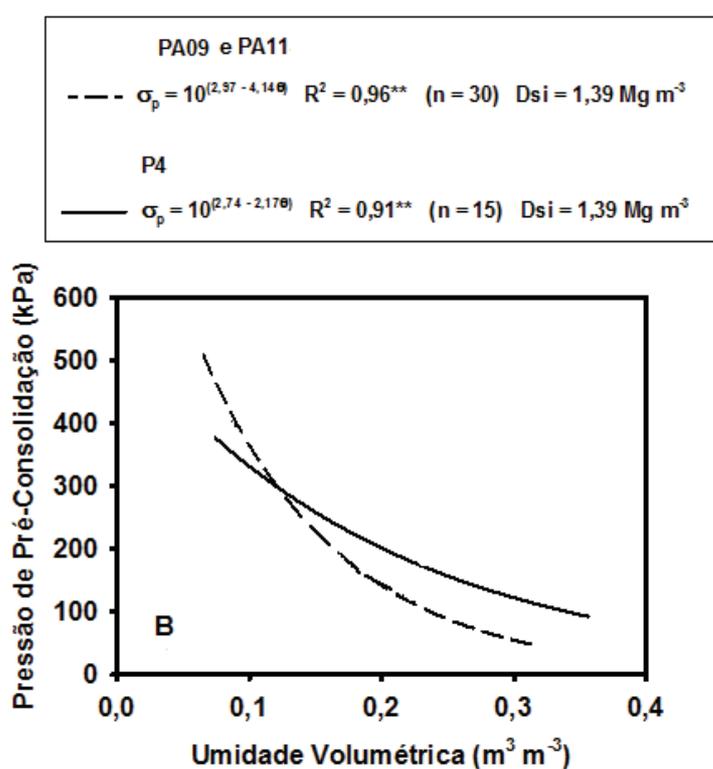


Figura 3 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4) e para os horizontes B

A partir dos modelos de capacidade de suporte de carga, utilizando os critérios apresentados na figura 1, determinou-se a porcentagem de amostras

compactadas pelas operações realizadas com o Harvester nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B (Tabela 3).

Tabela 3 Porcentagem de amostras compactadas pelas operações realizadas com o Harvester nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de solo	Horizonte BA
PA09	47
PA11	33
P4	47
Horizonte B	
PA09	33
PA 11	27
P4	47

Observa-se que o tráfego do Harvester no horizonte BA do PA09 e do P4 resultou em uma maior porcentagem de amostras compactadas (47%) quando comparados ao PA11 (33%) (Tabela 3). Apesar dos modelos de capacidade de suporte de carga nos horizontes BA indicar uma maior resistência à compactação do P4 quando comparado ao PA11 (Figura 2), o P4 apresentou uma maior porcentagem de amostras compactadas (47%) (tabela 3).

O tráfego do Harvester no horizonte B do P4 apresentou uma maior porcentagem de amostras compactadas (47%) quando comparado ao PA11 (27%) e ao PA09 (33%) indicando um maior impacto na estrutura do solo em profundidade no P4.

O tráfego do Harvester nos horizontes BA causou maior compactação do que nos horizontes B (Tabela3), corroborando com Martins *et al.* (2013) que comparando diferentes profundidades também observaram maior porcentagem de amostras compactadas na camada superficial de um Latossolo Vermelho após o tráfego do Harvester.

A classe de solo P4 foi identificada como sendo a que sofreu maior compactação do solo no horizonte BA e no horizonte B. O P4 apresenta os maiores teores de areia (Tabela1), assim sendo, espera-se que a suscetibilidade do solo à compactação cresça à medida que o teor de areia dos solos aumente (SILVA *et al.*,1986; OHU *et al.*, 1987; RAGHAVAN *et al.*,1990) devido à maior capacidade de empacotamento das partículas do solo resultante da forma irregular dos grãos de areia (RICHART *et al.*, 2005).

A classe de solo PA11 foi identificada como sendo a que sofreu menor compactação do solo, após o tráfego do Harvester, no horizonte BA e no horizonte B, resultando em uma menor degradação da sua estrutura.

O tráfego do Forwarder para a condição fora do resíduo nos horizontes BA e B causou compactação em no mínimo 67% das amostras para o número de passadas 3 e 6 (Tabela 4). A compactação dos solos aumentou com o número de passadas do Forwarder, para o número de passadas igual a 16 a compactação ocorreu em 100% das amostras coletadas nos horizontes BA e B, esses resultados corroboram com os obtidos por Silva *et al.*,(2007), Dias Junior *et al.*,(2008), Silva *et al.*,(2010) e Martins *et al.*, (2013) que verificaram, em diferentes classes de solo, que a compactação do solo aumentou com a intensidade de tráfego do Forwarder.

A presença do resíduo promoveu distribuição das pressões aplicadas pelo Forwarder e, devido a isso, a compactação foi menor no horizonte BA e B para o número de passadas menores do que 12 quando comparado com a condição fora do resíduo, corroborando com Silva *et al.*,(2007) que observaram que os resíduos florestais tiveram efeito minimizador da compactação de dois Latossolos.

Para o número de passadas igual a 16 o resíduo não foi eficiente na distribuição das pressões e a porcentagem de amostras compactadas para essas

condições foram iguais a 100% (Tabela 4). Esse resultado indicou que apesar do efeito minimizador do resíduo na compactação do solo a alta intensidade de tráfego, ou seja, o número elevado de passadas na mesma área é decisivo na compactação do solo.

Tabela 4 Porcentagem de amostras compactadas pelos diferentes números de passadas do tráfego do Forwarder nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de solo	Tráfego	3 passadas	6 passadas	12 passadas	16 passadas
Horizonte BA					
PA09	Fora do resíduo	67	67	100	100
	Sobre o resíduo	0	0	50	100
PA11	Fora do resíduo	67	67	100	100
	Sobre o resíduo	0	50	100	100
P4	Fora do resíduo	100	100	100	100
	Sobre o resíduo	100	100	100	100
Horizonte B					
PA09	Fora do resíduo	67	67	67	100
	Sobre o resíduo	0	0	0	100
PA11	Fora do resíduo	67	100	100	100
	Sobre o resíduo	50	50	50	100
P4	Fora do resíduo	100	100	100	100
	Sobre o resíduo	100	50	50	50

O número de passadas 12 e 16 para a condição de tráfego fora do resíduo foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no B.

Já para a condição de tráfego sobre resíduo 16 passadas foi identificada como sendo a que causou maior compactação.

CONCLUSÕES

O tráfego do Harvester promoveu maior degradação da estrutura do P4 em ambos os horizontes.

Ocorreram incrementos na compactação dos solos com o aumento do número de passadas do Forwarder.

O resíduo florestal teve efeito minimizador da compactação do solo promovida pelo Forwarder.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG, à CAPES e à SUZANO PAPEL E CELULOSE o apoio financeiro concedido.

LITERATURA CITADA

ABRAF – Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**, Brasília, 2013.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 377 - 382.

COUTO, E. A. Diagnóstico estratégico do extremo sul da Bahia. **Revista Eletrônica do CESES**. Disponível em: <www.cesesb.edu.br/revista.php>. Acesso em: 01 set. 2009.

DAY, P.R. Particle fraction and particle size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 545 - 567.

DIAS JUNIOR, M.S.et al. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:2245-2253, 2008.

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

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

DIAS JUNIOR, M. de S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to Eucalyptus harvest operations. **Scientia 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, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

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

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.2, p.207-219, Dec. 2004.

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

LIBARDI, P.L. & FERNANDES, F.C.S. **Avaliação da qualidade do solo a partir de indicadores físico-hídricos do solo**. In: Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 16., Aracaju, 2006. Palestras...Aracaju, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006.

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

OHU, J.O. et al.Compaction characteristics of prominent agricultural soil in Borno State of Nigeria. **American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.30, p.1575-1577, 1987.

PIRES,B.S. Modelos de capacidade de suporte de carga de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:635-642, 2012.

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

RICHART, A. et al.Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina**, 26:321-344, 2005.

SECCO, D. et al. **Parâmetros de compressibilidade de um Latossolo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação em água**. In: Congresso brasileiro de ciência do solo, 30., Recife, 2005. Palestra... Recife,Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SILVA,A.R.; DIAS JUNIOR, M de S.; LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.42, n.1, p.89-93, jan. 2007.

SILVA,A.R.; DIAS JUNIOR, M de S.; LEITE, F.P. Propriedades físicas e mecânicas de latossolos em diferentes manejos florestais. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1483-1491, nov./dez., 2010.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 10: 91-95, 1986.

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

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

THEBALDI, M.S. et al. Modelo de capacidade de suporte de carga de dois solos e impacto por tráfego humano. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v.3, n.1, p.57-69, 2012.

ARTIGO 3 IMPACTOS CAUSADOS SOBRE A ESTRUTURA DOS SOLOS PELAS OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL UTILIZANDO SISTEMA MISTO COM DESCASCAMENTO COM EQUIPAMENTO FLAIL ⁽¹⁾

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

Maria Luiza de Carvalho Andrade⁽²⁾, Moacir de Souza Dias Junior⁽³⁾, Ricardo Previdente Martins⁽⁴⁾, Paula Cristina Caruana Martins ⁽⁵⁾, Piero Iori ⁽⁶⁾ e Paula Sant' Anna Moreira Pais ⁽⁷⁾

RESUMO

As operações de colheita florestal são consideradas como uma das principais atividades que promovem degradação da estrutura do solo em áreas de exploração florestal, devido à compactação do solo causada pelo tráfego intenso das máquinas. O objetivo deste estudo foi: determinar a partir dos modelos de capacidade de suporte de carga das seguintes classes de solos: Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodosolo

⁽¹⁾ Parte da dissertação da primeira autora.

⁽²⁾ Mestranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: andrade.marialuiza@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista CNPq e Pesquisador Mineiro FAPEMIG – Universidade Federal de Lavras - Caixa Postal 3037, CEP 37.200-000, Lavras- MG. E-mail: msouzadj@dcu.ufla.br

⁽⁴⁾ Engenheiro Agrônomo MSc em Agricultura Tropical e Subtropical- Divisão de Tecnologia Florestal – UNF/BA - Suzano Papel e Celulose. E-mail: rpmartins@suzano.com

⁽⁵⁾ Bolsista de Pós-doutorado - Júnior-PDJ-CNPq - Programa de Pós-graduação em Ciência do solo – DCS-UFLA. E-mail: pccaruana@hotmail.com

⁽⁶⁾ Professor substituto da Universidade Estadual Paulista – UNESP - Campus Experimental de Registro – SP. E-mail: pieroiori@hotmail.com

⁽⁷⁾ Doutoranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras –UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras-MG. E-mail: paulaufla@yahoo.com.br

(P4) os impactos causados pelas máquinas florestais que compõe um sistema alternativo de colheita. Avaliou-se a compactação causada nos horizontes BA e B, pelo: Feller Buncher, Skidder, Flail, Power Clamp e Garra Traçadora. O estudo foi realizado em áreas comerciais pertencentes à Suzano Papel e Celulose, situadas no município de Teixeira de Freitas-BA. Foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, antes das operações de colheita florestal, 15 amostras indeformadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 3 classes de solo) para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga das citadas classes de solo. Para avaliar a compactação causada pela operação de corte das árvores de eucalipto usando o Feller Buncher 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 3 classes de solo x 2 horizontes). A fim de avaliar a compactação promovida com o aumento do número de passadas do tráfego do Skidder, 5 amostras indeformadas foram coletadas para cada passada totalizando 120 amostras (5 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes). Para avaliar compactação causada em pontos distintos dos diferentes apoios do Flail, 1 amostra indeformada foi coletada, totalizando 108 amostras (1 amostra x 6 apoios x 3 repetições x 3 classes de solos x 2 horizontes). Com o intuito de avaliar a compactação promovida pelas operações do Power Clamp, 5 amostras indeformadas foram coletadas, para as classes de solo PA11 e P4, totalizando 20 amostras (5 amostras x 2 classes de solo x 2 horizontes) e 3 amostras indeformadas foram coletadas, para a classe de solo PA09, totalizando 6 amostras (3 amostras x 1 classe de solo x 2 horizontes) e, finalmente, para avaliar a compactação promovida pela Garra Traçadora, 5 amostras indeformadas foram coletadas, para as classes de solo PA11 e P4, totalizando 20 amostras (5 amostras x 2 classes de solo x 2 horizontes) e 7 amostras

indeformadas foram coletadas, para a classe de solo PA09, totalizando 14 amostras (7 amostras x 1 classe de solo x 2 horizontes). Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload. As operações mecanizadas promoveram maior compactação nos horizontes BA. O número de passadas iguais a 12 e 16 com o Skidder foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no B. A classe de solo que mais sofreu compactação foi o PA09.

Termos de indexação: Compactação. Sustentabilidade. Pressão de pré-consolidação. Capacidade de suporte de carga. Eucalipto.

IMPACTS CAUSED OVER THE SOIL STRUCTURES BY FOREST HARVESTING OPERATIONS USING MIXED SYSTEM WITH FLAIL EQUIPMENT DEBARKING

ABSTRACT

Forest harvesting operations are considered one of the main activities which promote soil structure degradation in forest exploration areas, due to soil compaction caused by intense machinery trafficking. The objective of this study was: to determine from the bearing capacity models of the following soil classes: Yellow Argisol (PA09 – with mottle), Yellow Argisol (PA11) and Spodosol (P4) the impacts caused by forest machinery which comprise an alternative harvesting system. The compaction caused on BA and B horizons, by: Feller Buncher, Skidder, Flail, Power Clamp and Tracing Claw was evaluated. The study was performed in commercial areas belonging to Suzano Papel e Celulose, located in Teixeira de Freitas county, BA, Brazil. On the top of BA and B horizons, 15 undisturbed soil samples were randomly collected, before the forest

harvesting operations, totalizing 90 samples (15 samples x 2 horizons x 3 soil classes) to obtaining of the bearing capacity models of the mentioned soil classes. To evaluate the compaction caused by the eucalyptus tree cutting operation using the Feller Buncher 15 undisturbed soil samples were collected, totalizing 90 samples (15 samples x 3 soil classes x 2 horizons). In order to evaluate the compaction caused with the increase of the number of passes of the Skidder, 5 undisturbed soil samples were collected for each pass totalizing 120 samples (5 samples x 4 passes x 3 soil classes x 2 horizons). To evaluate the compaction caused in distinct points of the different Flail supports, 1 undisturbed soil sample was collected, totalizing 108 samples (1 sample x 6 supports x 3 replicates x 3 soil classes x 2 horizons). With the intent of evaluating the compaction caused by the Power Clamp operations, 5 undisturbed soil samples were collected, for the soil classes PA11 and P4, totalizing 20 samples (5 samples x 2 soil classes x 2 horizons) and 3 undisturbed soil samples were collected, for the soil class PA09, totalizing 6 samples (3 samples x 1 soil class x 2 horizons) and, finally, to evaluate the compaction caused by the Tracing Claw, 5 undisturbed soil samples were collected, for the soil classes PA11 and P4, totalizing 20 samples (5 samples x 2 soil classes x 2 horizons) and 7 undisturbed soil samples were collected, for the soil class PA09, totalizing 14 samples (7 samples x 1 soil class x 2 horizons). All samples were submitted to uniaxial compression test using a consolidometers of the Durham Geo Slope® brand model S-450 Terraload. The mechanized operations promoted higher compaction on horizons BA. The number of passes equal to 12 and 16 with the Skidder were identified as those which promoted higher soil compaction wither in BA or B horizon. The soil class which most suffered compaction was PA09.

Indexation terms: Compaction. Sustainability. Precompression stress. Load support capacity. Eucalyptus.

INTRODUÇÃO

A indústria florestal, com a finalidade de preservar as áreas florestadas, tem investido em estratégias diferenciadas em suas etapas de produção, buscando uma produtividade sustentável.

A sustentabilidade dos sistemas florestais depende, dentre outros fatores, da avaliação e monitoramento do uso do solo e estes, por sua vez, são inerentes às operações florestais mecanizadas (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005), uma vez que a necessidade de realizar a colheita florestal em grandes áreas lança o desafio de aumentar o tráfego intenso de máquinas, sem que estas causem alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo, degradando a sua estrutura e resultando na sua compactação (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005, SILVA *et al.*, 2007).

A pressão de pré-consolidação é uma propriedade do solo que é usada como indicador da capacidade de suporte de carga e da resistência mecânica do solo, estimando quantitativamente o risco de compactação do solo (ALAKUKKU *et al.*, 2003). Portanto, a pressão de pré-consolidação é a maior pressão que deve ser aplicada aos solos para evitar a sua compactação adicional (SILVA *et al.*, 2007; ARAUJO-JUNIOR *et al.*, 2011; PACHECO & CANTALICE, 2011).

O modelo de capacidade de suporte de carga desenvolvido por Dias Junior (1994) expressa a pressão de pré-consolidação em função da umidade do solo e indica um prognóstico da máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes umidades sem sofrer compactação adicional. Assim sendo, esta tem sido uma propriedade amplamente utilizada para avaliar os impactos na estrutura do solo adotando diferentes manejos sob diferentes culturas (SEVERIANO *et al.*,

2010; ARAUJO-JUNIOR *et al.*, 2011; MARTINS *et al.*,2012; PIRES *et al.*, 2012; PAIS *et al.*, 2013) abrangendo o manejo florestal (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005, SILVA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2010; MARTINS *et al.*,2013).

Diante disso, o objetivo deste estudo foi: determinar a partir dos modelos de capacidade de suporte de carga das seguintes classes de solos: Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA 11) e Espodossolo (P4) os impactos causados pelas máquinas florestais que compõem o sistema alternativo de colheita florestal foi composto por máquinas do sistema de árvores inteiras (Full-tree) e descascamento e traçamento realizados no campo, empregando um conjunto de 5 máquinas, a saber: Feller Buncher, Skidder, Flail-Delimeter-Debaker, Power Clamp e Garra Traçadora.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em áreas comerciais pertencentes à Suzano Papel e Celulose, situadas no município de Teixeira de Freitas no extremo sul da Bahia com coordenadas 17° 32' 27 "S de latitude e 39° 44' 25" O de longitude e altitude média de 624 m. O clima caracteriza-se como quente e úmido, sem estação seca definida tipo Af, conforme classificação de Köppen. A pluviosidade média anual varia de 1.100 a 1.500 mm (COUTO, 2009).

As classes de solos analisadas foram as seguintes: Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4). Todas as classes cultivadas com eucaliptos *E. grandis* x *E. urophylla*.

Foram coletadas, aleatoriamente, no topo dos horizontes BA e B, antes das operações de colheita florestal, 15 amostras indeformadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 2 horizontes x 3 classes de solo) para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga das citadas classes de solo.

Para preservar a integridade das amostras indeformadas desde o momento da coleta até a realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório, todas as amostras foram cuidadosamente envoltas em filme plástico e parafinadas no campo. As amostras indeformadas foram coletadas usando um amostrador tipo Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura.

Através das amostras deformadas provenientes do excesso de solo das partes superiores e inferiores dos anéis de amostragem foram determinadas às seguintes análises de caracterização física: textura (DAY, 1986) e densidade de partículas (BLAKE & HARTGE, 1986). Estes resultados são apresentados na Tabela 1.

As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload, cuja aplicação das pressões se faz através da utilização de ar comprimido. As pressões aplicadas às amostras foram as seguintes: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% de sua deformação máxima fossem alcançadas (TAYLOR, 1948; HOLTZ & KOVACS, 1981), somente após esta condição ter sido alcançada é que se aplicou uma nova pressão.

Tabela 1 Caracterização física do Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4).

Classe de solo	Horizonte	Dp Mg m⁻³	Argila -----	Silte g Kg⁻¹	Areia -----
PA09	BA	2,57 ¹	170 ¹	10 ¹	820 ¹
	Bt	2,57	290	50	660
PA11	BA	2,56	120	20	860
	Bt	2,57	200	30	770
P4	BA	2,60	60	20	920
	Bts	2,58	220	40	740

1 = média de 3 repetições; Dp = densidade de partículas

Após a realização dos ensaios de compressão uniaxial, as pressões de pré-consolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), nas curvas de compressão do solo.

A comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga foi feita utilizando-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989).

O sistema alternativo de colheita florestal foi composto por máquinas do sistema de árvores inteiras (Full-tree) e descascamento e traçamento realizados no campo, empregando um conjunto de 5 máquinas, a saber: corte – Feller Buncher (marca TIGERCAT, modelo L860C), extração – Skidder (marca TIGERCAT, modelo 635D), descascamento – Flail-Delimer-Debaker (marca TIGERCAT, modelo 604), coleta e movimentação – Power Clamp (marca TIGERCAT, modelo T250B) e processamento de toras – Garra Traçadora (marca TIGERCAT, modelo T250B) .

Para avaliar a compactação causada sobre a estrutura dos solos pela operação de corte das árvores de eucalipto usando o Feller Buncher 15 amostras indeformadas foram coletadas, totalizando 90 amostras (15 amostras x 3 classes

de solo x 2 horizontes). A fim de avaliar a compactação promovida com o aumento do número de passadas do tráfego do Skidder, 5 amostras indeformadas foram coletadas para cada passada totalizando 120 amostras (5 amostras x 4 passadas x 3 classes de solo x 2 horizontes). Para avaliar compactação causada em pontos distintos dos diferentes apoios do Flail 1 amostra indeformada foi coletada, totalizando 108 amostras (1 amostra x 6 apoios x 3 repetições x 3 classes de solos x 2 horizontes). Com o intuito de avaliar a compactação promovida pelas operações do Power Clamp 5 amostras indeformadas foram coletadas, para as classes de solo PA11 e P4, totalizando 20 amostras (5 amostras x 2 classes de solo x 2 horizontes) e 3 amostras indeformadas foram coletadas, para a classe de solo PA09, totalizando 6 amostras (3 amostras x 1 classe de solo x 2 horizontes) e, finalmente, para avaliar o impacto promovido pela Garra Traçadora 5 amostras indeformadas foram coletadas, para as classes de solo PA11 e P4, totalizando 20 amostras (5 amostras x 2 classes de solo x 2 horizontes) e 7 amostras indeformadas foram coletadas, para a classe de solo PA09, totalizando 14 amostras (7 amostras x 1 classe de solo x 2 horizontes).

Estas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial exposto anteriormente, na umidade em que as operações foram realizadas. A seguir, as pressões de pré-consolidação foram obtidas para cada condição especificada anteriormente. As pressões de pré-consolidação foram então representadas nos modelos de capacidade de suporte de carga de cada classe de solo utilizando os critérios (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005) apresentados na figura 1.

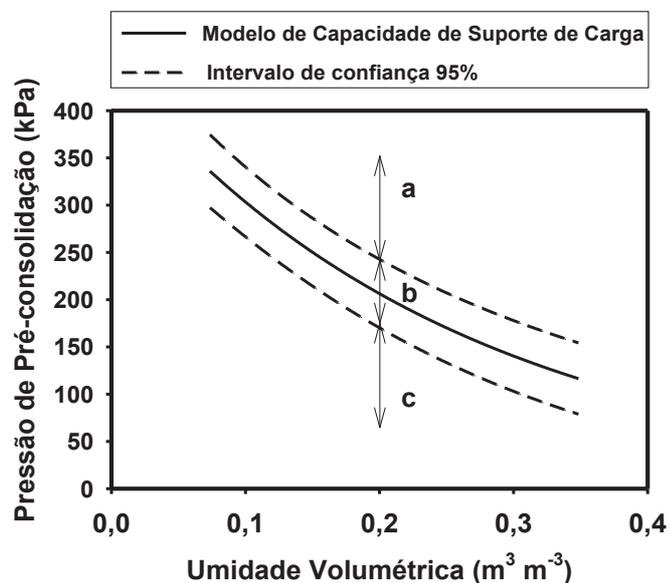


Figura 1 Critérios utilizados na determinação dos impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura dos horizontes BA e B do Argissolo Amarelo (PA09 - com mosqueado), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4). As regiões “a”, “b” e “c” representam: (a) região onde já ocorreu a compactação do solo, (b) região onde não ocorre a compactação do solo. Esta região indica as amostras que poderão sofrer compactação nas próximas operações de colheita, se as pressões aplicadas forem maiores do que as pressões de pré-consolidação do limite superior do intervalo de confiança e (c) região onde não ocorre a compactação do solo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA do PA09, PA11 e P4 estão apresentados na figura 2. Os valores dos parâmetros estimados “a” e “b” do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] variaram de 2,62 a 2,67 e de -1,86 a -3,24, respectivamente (Figura 2). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,89 a 0,96, sendo todos significativos a 1 % pelo teste t-Student (Figura 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA das diferentes classes de solo diferiram estatisticamente (Tabela 2) e estão apresentados na Figura 2.

Tabela 2 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] dos horizontes BA e B para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Horizonte BA			
PA09 x P4	H	**	**
PA11 x PA09	H	*	**
PA11 x P4	H	ns	*
Horizonte B			
PA11 x PA09	H	ns	ns
PA11 e PA09 x P4	H	**	**

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; **, * e ns: significativos a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.

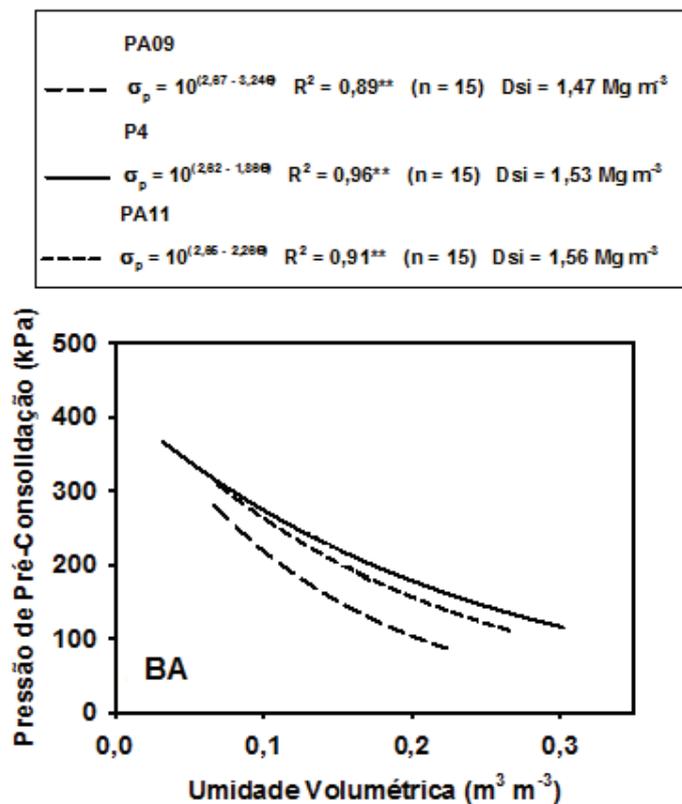


Figura 2 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09), Espodosolo (P4) e Argissolo Amarelo (PA11) para os horizontes BA

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do PA09 e PA11 não diferiram estatisticamente (Tabela 2) e, assim, uma nova equação foi obtida, considerando todos os valores de $\sigma_p \times \theta$, e os dois modelos foram agrupados em um único modelo (Figura 3) indicando capacidades de suporte de cargas iguais. Este novo modelo diferiu estatisticamente do modelo do horizonte B do P4 (Tabela 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes B do PA09 x PA11 e P4 estão apresentados na figura 3. Os valores dos parâmetros estimados “a” e “b” do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] variaram de 2,74 a 2,97 e de -2,17 a -4,14 respectivamente (Figura 3). Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,91 a 0,96, sendo significativos a 1 % (Figura 3).

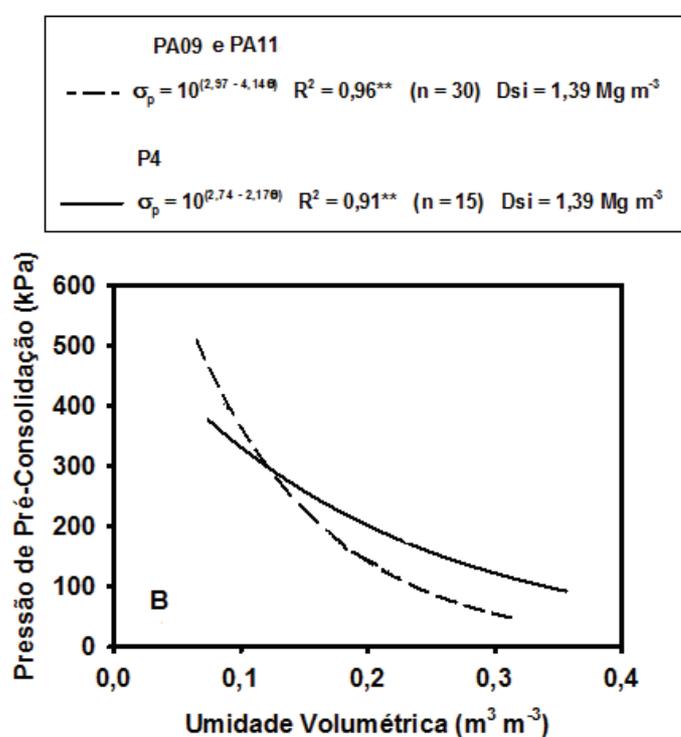


Figura 3 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09), Argissolo Amarelo (PA11) e Espodossolo (P4) e para os horizontes B

Os modelos de capacidade de suporte de carga foram comparados nos horizontes BA e B dentro de cada classe de solo (Tabela 3) e estão apresentados nas figuras de 4 a 6.

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA e B do PA09, PA11 e P4, diferiram estatisticamente indicando diferentes capacidades de suporte de cargas (Tabela 3). O horizonte B apresentou, em geral, maior capacidade de suporte de carga do que o horizonte BA

Tabela 3 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] dos horizontes BA e B para as diferentes classes de solo.

Classe de solo	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
PA09	H	*	*
PA11	H	**	ns
P4	H	ns	*

⁽¹⁾ Snedecor & Cochran (1989). H: homogêneo; **, * e ns: significativos a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.

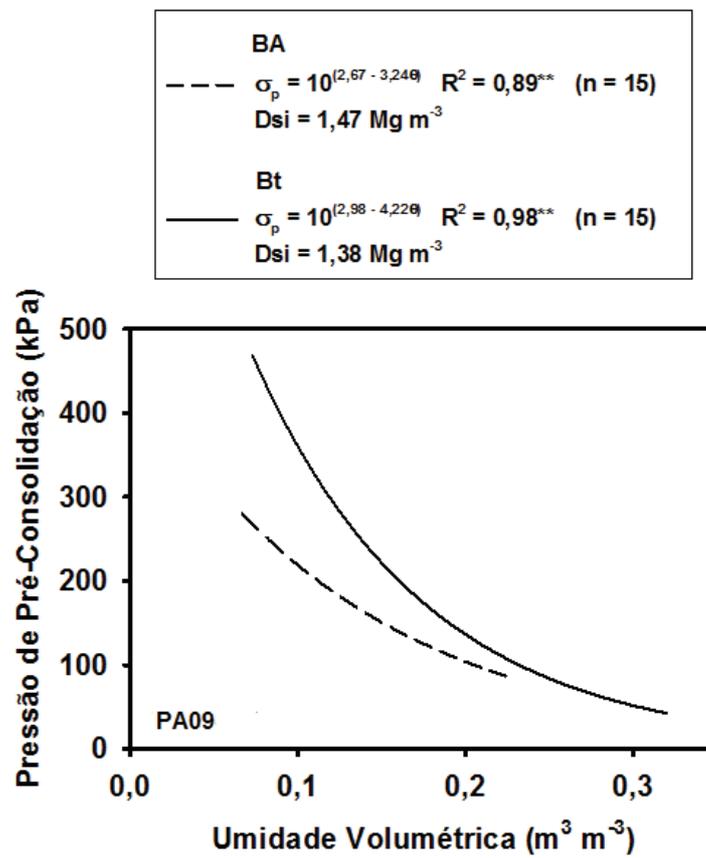


Figura 4 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA09) para os horizontes BA e Bt

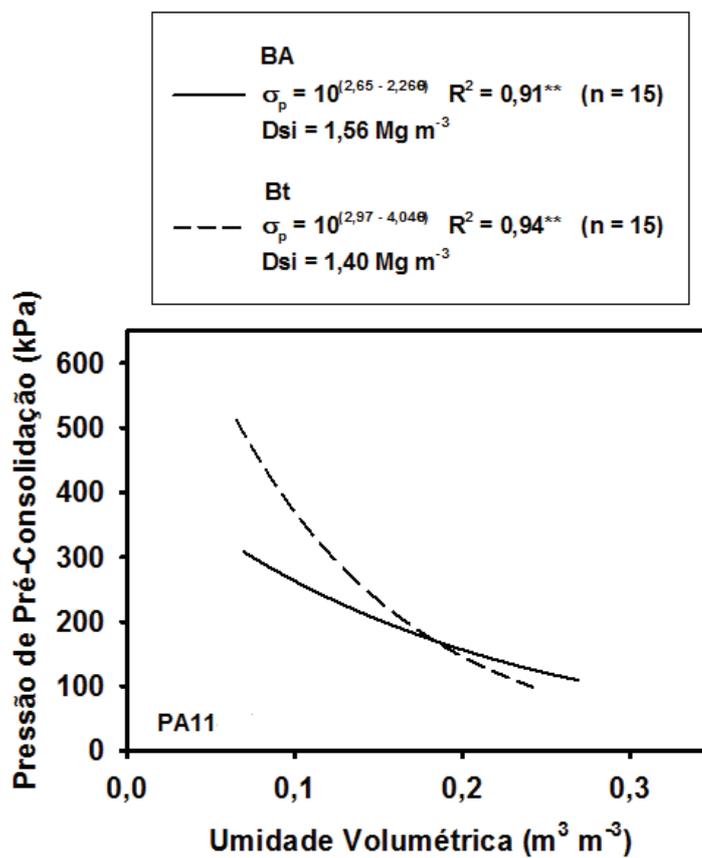


Figura 5 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Argissolo Amarelo (PA11) para os horizontes BA e Bt

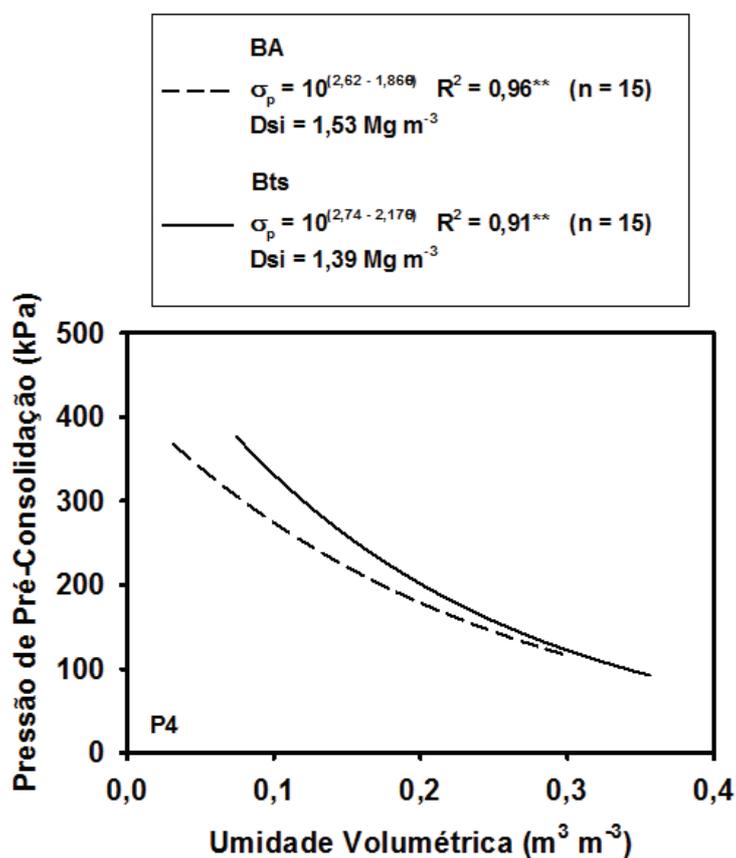


Figura 6 Modelos de capacidade de suporte de carga para o Espodossolo (P4) para os horizontes BA e Bts

A partir dos modelos de capacidade de suporte de carga, utilizando os critérios apresentados na figura 1, determinou-se a porcentagem de amostras compactadas pelas operações realizadas com o Feller Buncher nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B (Tabela 4).

O tráfego do Feller Buncher no horizonte BA do PA09 (Tabela 4) promoveu maior compactação (60%) quando comparado ao PA11 (13%) e ao P4 (7%). Os modelos de capacidade de suporte de carga nos horizontes BA indicaram uma maior resistência à compactação do P4 (Figura 2), esta maior

resistência refletiu em um menor impacto na qualidade estrutural deste solo. O tráfego do Feller Buncher no horizonte B do PA09 também promoveu uma maior compactação (47%) quando comparado ao PA11 (20%) e ao P4 (27%). Desse modo, a classe de solo PA09 foi identificada como sendo a sofreu maior compactação do solo, após o tráfego do Feller Buncher no horizonte BA e no horizonte B. Esse resultado se deve, provavelmente, devido à presença de mosqueado nesse Argissolo, que é uma característica de solos mal drenados (EMBRAPA, 2006) e indica que este solo possui disponibilidade hídrica originada pelas oscilações dos níveis do lençol freático, assim quando o conteúdo de água aumenta a resistência à compactação diminui (LOPES *et al.*, 2006).

O Feller Buncher no horizonte BA causou maior compactação do que no horizonte B no PA09, consoante com os modelos de capacidade de suporte de carga (Figuras 4), uma vez que o horizonte B apresentou-se mais resistente à compactação, posto que, o horizontes BA apresenta maiores teores de areia (Tabela1) e a suscetibilidade do solo à compactação é maior à medida que o teor de areia dos solos aumenta (SILVA *et al.*,1986; OHU *et al.*, 1987; RAGHAVAN *et al.*,1990; SEVERIANO *et.al.*, 2010). Tal fato pode explicar a diferença na suscetibilidade à compactação entre os horizontes, entretanto o mesmo não é possível afirmar quando se compara as classes de solo. O P4 no horizonte BA possui maiores teores de areia e promoveu menor compactação (7%) quando comparado ao PA11 e PA09 que apresentaram menores teores de areia e promoveram maior compactação (13%) e (60%), respectivamente (Tabela 1 e Tabela 4).

Tabela 4 Porcentagem de amostras compactadas pelas operações realizadas com o Feller Buncher nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de solo	Horizonte BA
PA09	60
PA11	13
P4	7
Horizonte B	
PA09	47
PA11	20
P4	27

Observa-se que o horizonte BA sofreu maior compactação do que o horizonte B na maioria do número de passadas do Skidder (Tabela 5). Esses resultados podem ser explicados devido a maior suscetibilidade à compactação do horizonte BA, relatada anteriormente. Sampietro & Lopes (2011) também observaram maior compactação após o tráfego com o aumento do número de passadas do tráfego do Skidder nas camadas superficiais.

Os números de passadas iguais a 12 e 16 foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no B (Tabela 5). Estes resultados corroboram com os encontrados por Sampietro & Lopes (2011) que observaram em um Cambissolo Húmico Aluminíco típicos incrementos na densidade do solo com aumento do número de passadas do Skidder.

Apesar do PA11 indicar que não houve maior compactação após o aumento do número de passadas do Skidder (Tabela 5) no horizonte BA (40%) e no horizonte B (60%), para o número de passadas igual a 16 as amostras se posicionaram, nos gráficos, próximas ao limite superior do intervalo de confiança, conforme os critérios apresentados na Figura 1, indicando um

aumento na tendência à compactação e que, provavelmente, com o número de passadas superior a 16 resultaria em aumento da compactação.

Em todas as classes de solo as operações realizadas com Skidder promoveram maior compactação do solo quando comparadas às operações realizadas com o Feller Buncher, corroborando com Dias Junior *et al.*(2005) e Dias Junior *et al.*(2007) que consideraram que as operações de baldeio da madeira são as que mais degradam a estrutura do solo.

Tabela 5 Porcentagem de amostras compactadas pelos diferentes números de passadas do Skidder nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de solo	3 passadas	6 passadas	12 passadas	16 passadas
Horizonte BA				
PA09	40	60	100	100
PA11	40	40	40	40
P4	0	80	80	80
Horizonte B				
PA09	0	40	60	60
PA11	60	60	60	60
P4	60	60	60	80

Observa-se que a compactação do solo ocorreu por influência de todas as partes do Flail nos dois horizontes (Tabela 6), exceto no apoio hidráulico traseiro direito (AHTd) e no apoio hidráulico traseiro esquerdo (AHTe) do PA09 e PA11 e no apoio hidráulico dianteiro direito (AHDd) e no pneu traseiro direito (PTd) do PA11 nos horizontes BA e no apoio hidráulico traseiro direito (AHTd), apoio hidráulico traseiro esquerdo (AHTe), apoio hidráulico dianteiro esquerdo (AHDe) e pneu traseiro esquerdo (PTe) do PA11 no horizonte B. Esses resultados evidenciam que o PA11 foi o solo que menos sofreu impacto na sua estrutura com as operações do Flail.

A partir de 01/03/2013 o Flail não dispôs dos pneus dianteiros para deslocar dentro do talhão, ficando apoiado exclusivamente no apoio hidráulico

da dianteira. Esse fato refletiu em uma maior porcentagem de amostras compactadas no apoio hidráulico dianteiro quando comparado ao apoio hidráulico traseiro (Tabela 6). Ao se comparar os impactos causados pelo apoio hidráulico dianteiro com os pneus traseiros pode-se observar que os apoios hidráulicos dianteiros promoveram maior compactação nos solos do que os pneus traseiros (Tabela 6). A compactação promovida pelos pneus traseiros só não foi maior devido à ação dos apoios hidráulicos que suportaram parte da pressão aplicada reduzindo assim, as pressões suportadas pelos pneus e consequentemente reduzindo a compactação que poderia ser promovida por esses pneus.

Tabela 6 Porcentagem de amostras compactadas pelas diferentes partes do Flail nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de Solo	Partes do Flail	Ponto			Média
		1	2	3	
Horizonte BA					
PA09	AHDd	0	100	100	67
	AHDe	0	0	100	33
	PTe	100	0	100	67
	PTd	67	33	33	44
	AHTd	0	0	0	0
	AHTe	0	0	0	0
	PA11	AHDd	0	0	0
AHDe		0	100	0	33
PTe		0	67	0	22
PTd		0	0	0	0
AHTd		0	0	0	0
AHTe		0	0	0	0

P4	AHDd	100	100	0	67
	AHDe	100	100	100	100
	PTe	100	100	33	78
	PTd	100	100	0	67
	AHTd	100	100	0	67
	AHTe	0	100	0	33
Horizonte B					
PA09	AHDd	100	100	100	100
	AHDe	0	100	100	67
	PTe	67	67	67	67
	PTd	33	100	100	78
	AHTd	100	100	100	100
	AHTe	100	100	100	100
PA11	AHDd	100	0	0	33
	AHDe	0	0	0	0
	PTe	0	0	0	0
	PTd	0	0	33	11
	AHTd	0	0	0	0
	AHTe	0	0	0	0
P4	AHDd	100	100	0	67
	AHDe	100	100	100	100
	PTe	100	67	67	78
	PTd	100	100	67	89
	AHTd	100	100	0	67
	AHTe	100	100	100	100

AHDd= apoio hidráulico dianteiro direito; AHDe= apoio hidráulico dianteiro esquerdo; PTe= pneu traseiro esquerdo; PTd= pneu traseiro direito; AHTd= apoio hidráulico traseiro direito; AHTe= apoio hidráulico traseiro esquerdo)

O Flail promoveu maior compactação, em média, no P4 nos horizontes BA e B, esse resultado pode explicado pelos elevados teores de areia (Tabela1),

que resultam na maior capacidade de empacotamento das partículas do solo devido à forma irregular dos grãos de areia (RICHART *et al.*, 2005).

Os resultados apresentados na Tabela 5 apontam, ainda, que apesar dos modelos de capacidade de suporte de carga dos solos indicarem que os horizontes B são mais resistentes, em geral, à compactação do que os horizontes BA (Figuras 4, 5 e 6) o Flail promoveu, na maioria dos casos, nos horizontes B compactação igual ou maior quando comparado aos horizontes BA sugerindo uma propensão do Flail em promover a compactação do solo em profundidade o que sugere o seu uso em carreadores ou estradas visando evitar a compactação do solo nos talhões de plantio.

As operações realizadas com o Power Clamp (Grua) (Tabela 7) promoveram maior compactação no PA09 e no P4 em ambos os horizontes causando assim, maior degradação na estrutura desses solos, provavelmente, devido à presença de mosqueado no PA09 que apontam uma maior umidade natural e conseqüentemente solos sob condições de alta umidade deformam-se mais facilmente (SWAN *et al.*, 1987; DIAS JUNIOR, 1994), assim como ocorreu com o tráfego do Feller Buncher e devido aos elevados teores de areia do P4 (Tabela 1) corroborando com Ohu *et al.*, (1987) que observaram maior suscetibilidade à compactação nos solos com maiores teores de areia.

A classe de solo PA11 foi identificada como sendo a que sofreu menor compactação do solo, após as operações do Power Clamp (Tabela 7) no horizonte BA (40%) e no horizonte B (0%), sendo, portanto, solo que menos sofreu impacto na sua estrutura.

Tabela 7 Porcentagem de amostras compactadas pelas operações do Power Clamp e da Garra Traçadora nas diferentes classes de solo nos horizontes BA e B.

Classe de solo	Power Clamp	Garra Traçadora
Horizonte BA		
PA09	67	57
PA11	40	60
P4	60	80
Horizonte B		
PA09	100	71
PA11	0	40
P4	100	60

As operações realizadas com o Power Clamp nos horizontes B promoveu, no PA09 e no P4, maior compactação quando comparados aos horizontes BA (Tabela 7) sugerindo uma tendência do Power Clamp em promover a compactação do solo em profundidade.

A Garra Traçadora promoveu maior compactação no P4 no horizonte BA (Tabela 7) causando assim, maior degradação na estrutura desse solo. No horizonte B a Garra Traçadora promoveu maior compactação no PA09 assim como ocorreu com o Feller Buncher e Power Clamp descritos anteriormente.

O horizonte BA sofreu maior compactação do que o horizonte B na maioria das classes de solo devido às operações da Garra Traçadora (Tabela 7). Esses resultados podem ser explicados devido a maior suscetibilidade à compactação do horizonte BA (Figuras 4, 5 e 6).

A Garra Traçadora, de modo geral, foi o equipamento que promoveu maior compactação do solo nos horizontes BA do PA11 e do P4, quando comparada ao Feller Buncher (Tabela 4), Skidder (Tabela 5), Flail (Tabela 6) e Power Clamp (Tabela 7), corroborando com Martins *et al.*, (2013) que identificou a Garra Traçadora como o equipamento que promove maior degradação da estrutura do solo.

CONCLUSÕES

As operações mecanizadas promoveram maior compactação nos horizontes BA.

O número de passadas iguais a 12 e 16 com o Skidder foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no B.

A classe de solo que mais sofreu compactação com as operações mecanizadas de colheita florestal foi o PA09.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG, à CAPES e à SUZANO PAPEL E CELULOSE o apoio financeiro concedido.

LITERATURA CITADA

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**, 35:115-131, 2011.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 377 - 382.

COUTO, E. A. Diagnóstico estratégico do extremo sul da Bahia. **Revista Eletrônica do CESES**. Disponível em: <www.cesesb.edu.br/revista.php>. Acesso em: 01 set. 2009.

DAY, P.R. Particle fraction and particle size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, 1986. p. 545 - 567.

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

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

DIAS JUNIOR, M. de S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to Eucalyptus harvest operations. **Scientia 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, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

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. 306p

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

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

MARTINS, P.C.C. et al. Compaction caused by mechanized operations in a redyellow latosol cultivated with coffee over time. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 36, n. 4, p. 391-398, jul./ago., 2012.

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

OHU, J.O. et al. Compaction characteristics of prominent agricultural soil in Borno State of Nigeria. **American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.30, p.1575-1577, 1987.

PEDROTTI, A. & DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. **R. Agropec. Catarinense**, 9:50-52, 1996

PIRES, B.S. Modelos de capacidade de suporte de carga de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:635-642, 2012.

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

RICHART, A. et al. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina**, 26:321-344, 2005.

SAMPIETRO, J.A.; LOPES, E.S. Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder*. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 265-272, jun. 2011.

SEVERIANO, E.C. et al. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim tifton 85. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, 14:39-45, 2010.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M de S.; LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.42, n.1, p.89-93, jan. 2007.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M de S.; LEITE, F.P. Propriedades físicas e mecânicas de latossolos em diferentes manejos florestais. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1483-1491, nov./dez., 2010.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 10: 91-95, 1986.

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

SWAN, J.B. et al. **Soil compaction causes, effects, and control**. St. Paul: University of Minnesota, 1987. Agriculture Bulletin, 3115.

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

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomendações para diminuir a compactação do solo pelo sistema alternativo de colheita (Flail):

- 1) Utilizar os resíduos vegetais para minimizar o impacto da compactação do solo;
- 2) Analisar a possibilidade de operar o equipamento Flail nos carregadores, fora do talhão sempre que possível;
- 3) Espalhar os resíduos da colheita sobre o local de operação da Power Clamp e da Garra Traçadora;
- 4) Espalhar resíduos da colheita florestal na praça de trabalho de alimentação do Flail, reduzindo a compactação pelo tráfego do Skidder.