

COMPACTAÇÃO CAUSADA PELO TRÁFEGO DE *FELLER BUNCHER* E *SKIDDER* EM UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB DISTINTAS UMIDADES

COMPACTION CAUSED BY FELLER-BUNCHER AND SKIDDER TRAFFIC IN AN ENTISOL UNDER DISTINCT MOISTURES

Jean Alberto Sampietro¹ Eduardo da Silva Lopes² José Miguel Reichert³

RESUMO

Esta pesquisa objetivou avaliar a influência da umidade na compactação de um Neossolo Regolítico submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal e desenvolver modelos para estimativa da compactação. O trabalho foi conduzido em áreas de uma empresa florestal localizada no Estado de Santa Catarina. A amostragem foi realizada em diversas condições de umidade do solo, contemplando três classes: U_{g_1} ($U_g < 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$); U_{g_2} ($0,30 \leq U_g < 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$) e U_{g_3} ($U_g \geq 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$). Determinou-se a densidade do solo (D_s), a porosidade total (Pt) e de aeração (PA) e a resistência à penetração (RP), nas condições sem tráfego (ST) e após tráfego (AT) de um *Feller buncher* (CAT 522) e um *Skidder* (CAT 545) utilizados na colheita da madeira de povoamentos de *Pinus taeda*. Foram ajustadas equações de regressão múltipla para estimar a RP, por meio de modelos aritméticos e logarítmicos com variáveis puras e mistas. Os resultados indicaram que em condição de umidade superior a $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$ (U_{g_3}), o tráfego promoveu aumento da D_s e RP da ordem de 10 e 24% e redução da Pt e da PA, da ordem de 12 e 43%, respectivamente. Em baixa umidade ($U_g < 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$), o aumento da D_s e RP foi da ordem de 3 e 13%, respectivamente, e redução da PA da ordem de 8% e sem efeito na Pt. O modelo por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) ($\ln RP = -1,11 + 0,64D_s^2 + 0,14U_g^{-1}$) apresenta os melhores resultados para estimativa da resistência do solo à penetração, mas deve haver cautela no seu emprego, devido à possibilidade de influência de outros fatores na estimativa e determinação da RP.

Palavras-chave: mecanização florestal; física do solo; modelagem da compactação.

ABSTRACT

This research evaluated the influence of water content on soil compaction of an Entisol under traffic of forest harvesting machines and developed models to estimate soil compaction. The study was conducted in areas of a forest company, located in the state of Santa Catarina, Brazil. The sampling was performed under various conditions of soil moisture, contemplating three classes: U_{g_1} ($U_g < 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$); U_{g_2} ($0,30 \leq U_g < 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$); U_{g_3} ($U_g \geq 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$). The soil bulk density was determined (D_s), total (Pt) and air-filled porosity (PA) and penetration resistance (RP), under the conditions without traffic (WT) and after traffic (AT) of a *Feller-buncher* (CAT 522) and a *Skidder* (CAT 545) employed in wood harvesting of *Pinus taeda* stands. Multiple regression equations were adjusted to estimate the soil penetration resistance, through arithmetic and logarithmic models with pure and mixed variables. The results indicate that in moisture condition above than $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$ (U_{g_3}), the traffic promoted increase in Bd and PR of 10 and 24%, respectively, and decrease in α_t and α_{air} , in order of 12 and 43%. In low moisture content ($U_g < 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$), the increase of Bd and PR was 3 and 13%, respectively, and the decrease of α_{air} of 8% and without effect in α_t . The stepwise logarithmic model with mixed variables (SLMM) showed the best results for the estimation

1 Engenheiro Florestal, Msc., Doutorando em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. engsampietro@yahoo.com

2 Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, Caixa Postal 21, CEP 84500-000, Irati (PR), Brasil. eslopes@pq.cnpq.br

3 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. reichert@smail.ufsm.br

of soil penetration resistance, but caution must be raised in their employment due to the possible influence of other factors in the estimation and determination of PR.

Keyword: forest mechanization; soil physics; modeling of the compaction.

INTRODUÇÃO

O processo de mecanização do setor florestal possibilitou uma evolução significativa na produtividade, na redução de custos e na melhoria da qualidade das operações florestais. Entretanto, o tráfego de máquinas de colheita de madeira é uma grande preocupação por parte dos gestores florestais, sendo responsável por impactos ambientais consideráveis, com destaque na compactação do solo, quando não há um planejamento adequado das operações.

A compactação consiste na aproximação das partículas do solo, com redução no volume por elas ocupado (REICHERT et al., 2010). O processo de compactação resulta de tensões aplicadas sobre o solo, trazendo incremento na densidade e redução do espaço poroso, na infiltração e no movimento interno de água, e maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes.

A compactação é máxima quando a umidade do solo é crítica para esse processo, sendo a umidade crítica próxima à capacidade de campo (REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009; REICHERT et al., 2010), com alta umidade, o solo se torna mais susceptível devido à redução da capacidade de suporte (SILVA et al., 2002; BRAIDA et al., 2010). Além disso, o tráfego indiscriminado e sem controle das máquinas de colheita de madeira na área faz com que esse problema seja agravado e, por consequência, a disseminação da compactação ao longo dos anos reduz a produtividade dos sítios e aumenta a erosão dos solos.

Devido o tráfego dos maquinários causar maior deformação no solo, quando este se encontra em condições úmidas, e como as operações de colheita da madeira são realizadas durante todo o ano em estações secas e chuvosas (DIAS JUNIOR et al., 2003), medidas de gerenciamento de tráfego são importantes, determinando-se os níveis aceitáveis de impacto para cada condição, e dessa forma, é possível reduzir os efeitos nocivos da compactação, impondo limites de tráfego das máquinas, de acordo com a umidade do solo (FROEHLICH, 1977). Outra solução é o tráfego controlado de tal modo que se mantenha a área mais favorável para o crescimento

das plantas, restringindo a compactação do solo para as faixas de trânsito.

Portanto, a umidade durante as operações florestais é um dos fatores que determinam a intensidade da deformação que poderá ocorrer no solo. Em condições de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e, assim, a compactação pode não ser significativa. No entanto, é importante ressaltar que não é somente a umidade do solo que determina sua susceptibilidade às alterações causadas pelo tráfego das máquinas. Outros fatores também são decisivos sobre o comportamento do solo e sua resistência à compactação, dentre os quais se destacam a classe de solo, a textura, o manejo e o teor de matéria orgânica do solo e a presença de resíduos culturais sobre a área (REICHERT et al., 2007; BRAIDA et al., 2010).

Diante disso, torna-se necessária a realização de estudos que visem contribuir com informações sobre os impactos da colheita de madeira nas propriedades do solo em diferentes condições de umidade, possibilitando o entendimento das relações entre variáveis que afetam esse processo, fornecendo subsídios para o planejamento das operações, conciliando sustentabilidade, aumento de produtividade e redução dos custos de produção.

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a influência da umidade na compactação de um Neossolo Regolítico submetido ao tráfego de máquinas de colheita em povoamentos de *Pinus taeda* L. e desenvolver modelos para estimativa da compactação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O trabalho foi conduzido em áreas operacionais pertencentes a uma empresa florestal, localizada na região Norte do Estado de Santa Catarina (26°42'52" S e 49°29'00" W), com altitude média de 530 m. O clima da região, de acordo com Köppen, é classificado como Cfb, com temperatura média anual de 19,7°C e precipitação média anual

entre 1.600 a 1.700 mm (GAPLAN, 1986).

Os povoamentos de *Pinus taeda* L. apresentavam 35 anos de idade na ocasião da realização da colheita de madeira, com 442 árvores por hectare, área basal de 45,82 m² ha⁻¹, volume médio de 654,35 m³ ha⁻¹, com peso médio individual por árvore de 0,89 t. Antes da implantação dos povoamentos florestais, a área era ocupada com cultivo de pastagens para fins de produção agropecuária.

O solo foi classificado como Neossolo Regolítico Húmico típico de textura franco-argiloarenosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado. Foram coletadas cinco repetições de amostras deformadas para determinação da granulometria pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), teor de carbono orgânico (C-org) pelo método Walkey-Black (ALISSON, 1965), limite de liquidez (LL) pelo método de Casagrande (SOWERS, 1965), capacidade de campo (CC) por equilíbrio ao potencial matricial de -10 kPa em coluna de areia (REINERT e REICHERT, 2006) e ponto de murcha permanente (PMP) por equilíbrio ao potencial de -1500 kPa por meio de um psicrômetro de ponto de orvalho (DECAGON, 2000) (Tabela 1).

Ressalta-se que o limite e índice de plasticidade não foram determinados devido ao solo apresentar comportamento não plástico.

Sistema de colheita da madeira e camada de resíduos

O sistema de colheita estudado foi o de Árvores Inteiras (*Full-tree*), composto por um trator florestal *Feller buncher* (CAT 522), com peso operacional de 30,4 t e rodados de esteiras de 0,6 x 4,8 m, e por um trator florestal *Skidder* (CAT 545) com peso operacional de 18,2 t, tração 4 x 4,

rodados de pneus de 0,8 m de largura, pressão de inflação de 290 kPa e os pneus dianteiros recobertos com semiesteiras. A quantidade de biomassa seca de resíduos que havia sobre o solo da área experimental era de aproximadamente 12,39 kg m⁻².

Procedimento amostral

A coleta das amostras, as medidas *in situ* de penetrometria e a determinação da umidade do solo foram realizadas após concluídas as operações de colheita de madeira, sem interferência no trabalho da empresa. As amostragens foram obtidas em diferentes períodos, em locais próximos entre si, acompanhando as operações de colheita em diversas condições de precipitação pluviométrica e contemplando as distintas umidades no solo.

A operação de colheita de madeira iniciava com o corte das árvores pelo trator florestal *Feller buncher*, que trafegava por toda área ao menos uma vez, e logo em seguida, era realizada o arraste das árvores do interior para a margem do talhão pelo trator florestal *Skidder*, que trafegava várias vezes pela área.

Com essa observação, foram instaladas parcelas amostrais de 10 x 25 m ao longo das trilhas de tráfego do *Skidder*, distribuídas de modo a representar as áreas próximas às estradas, no meio do talhão e mais distantes destas, procurando abranger diferentes intensidades de tráfego (número de passadas), contudo, sem haver controle da intensidade de tráfego, mantendo-se ainda as mesmas condições de relevo, com a finalidade de diminuir a variabilidade natural do solo.

Em cada parcela buscou-se amostrar nos sulcos formados pela passagem dos rodados das máquinas (AT - Após Tráfego) e em locais próximos, distante 2 m da trilha de tráfego, em solo não perturbado (ST - Sem Tráfego). Para cada situação

TABELA 1: Granulometria, teor de carbono orgânico (C-org), limite de liquidez (LL), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) por camada de um Neossolo Regolítico.

TABLE 1: Granulometry and organic carbon content (C-org), liquid limit (LL), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) by depth of an Entisol.

Camada (m)	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	C-org	LL	CC	PMP
	----- (g kg ⁻¹) -----				(g dm ⁻³)	----- (kg kg ⁻¹) -----		
0,0 – 0,15	42	591	205	162	26,8	0,405	0,304	0,163
0,15 – 0,30	148	483	184	186	32,8	0,393	0,290	0,160
0,30 – 0,50	111	540	16	334	28,8	0,366	0,314	0,187

dentro da parcela (Sem Tráfego e Após Tráfego), a amostragem foi feita em cinco pontos equidistantes quatro metros entre si e em três camadas de solo (0,0 a 0,15; 0,15 a 0,30 e 0,30 a 0,50 m), cabendo ressaltar que todas as amostras foram retiradas nas partes superior, média e inferior de cada camada, buscando uma melhor representatividade.

No total foram amostradas 14 parcelas, sendo que em cada parcela foi realizada a coleta em local Sem Tráfego (ST) e Após Tráfego (AT), totalizando 30 amostras por parcela (5 pontos amostrais x 3 camadas x 2 locais de coleta). Em seguida, procedeu-se com a classificação dos dados para estabelecer diferentes classes de umidade gravimétrica do solo. A distribuição dos dados em classes de umidade foi realizada em função do pareamento dos dados, correspondentes ao local Sem Tráfego (ST) e Após Tráfego (AT), por local de amostragem dentro da parcela. Ao final, foram analisadas as seguintes classes de umidade gravimétrica: U_{g_1} ($U_g < 0,30$ kg kg⁻¹); U_{g_2} ($0,30 \leq U_g < 0,40$ kg kg⁻¹); U_{g_3} ($U_g \geq 0,40$ kg kg⁻¹). A opção por trabalhar com essas classes deveu-se ao fato de serem essas as condições médias de umidade encontradas após cada período de amostragem, e também com base no limite de liquidez (LL) e capacidade de campo (CC) do solo. Após a classificação dos dados, totalizaram-se 140 amostras, em média, por classe de umidade gravimétrica.

Análises físicas do solo

A determinação da densidade (Ds), porosidade total (Pt) e de aeração (PA), e da umidade gravimétrica do solo (U_g) foi feita de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), sendo coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos de 100 cm³ (5,0 cm de diâmetro x 5,1 cm de altura). Também foram utilizadas equações para estimar a Ds crítica baseada no Intervalo Hídrico Ótimo ($D_{sc\ IHO} = -0,00078 \text{ Argila} + 1,83803$) ($R^2 = 0,92$) e a Ds crítica restritiva baseada no crescimento radicular de algumas culturas ($D_{sc\ Rest} = -0,00071 \text{ Argila} + 1,86180$) ($R^2 = 0,84$), conforme Reichert et al. (2009).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada nos mesmos pontos amostrais, com uso de um penetrógrafo eletrônico digital (EIJKELKAMP 06.15.SA), equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm², sendo as leituras realizadas em

intervalos de um centímetro até a profundidade de 0,80 m.

Análises estatísticas

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado. Para a Ds, Pt e PA as análises foram realizadas para as camadas de 0,0 a 0,15; 0,15 a 0,30 e 0,30 a 0,50 m, enquanto para a RP, embora as medições tenham sido feitas em intervalos de 1 cm, as análises foram realizadas em intervalos de 0,10 m até a profundidade de 0,80 m.

Os valores das variáveis foram avaliados pela diferença, em porcentagem, entre a situação ST e AT (Δ), pareados por local de amostragem dentro da parcela, sendo o cálculo para a Ds e RP: $\Delta (\%) = [(AT - ST) / ST] * 100$; e para a Pt e PA: $\Delta (\%) = [(ST - AT) / ST] * 100$. Os valores de Δ foram submetidos ao teste de Bartlett, para verificação da homogeneidade das variâncias, e em seguida a ANOVA, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para a avaliação de equações de estimativa da RP, primeiramente realizou-se uma análise exploratória dos dados, de acordo com os critérios citados por Tukey (1977), para detectar e eliminar dados *outliers*. Procedendo com o ajuste de equações de regressão múltipla para a estimativa da RP, usando como variáveis independentes a Ds e a U_g . Comparou-se: um modelo aritmético com variáveis puras (MAVP); um modelo ajustado por *stepwise* aritmético com variáveis mistas (MSAM); um modelo ajustado por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM); e o modelo proposto por Busscher (1990) linearizado e adaptado (MBLA). Para a avaliação estatística das equações, foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) (DRAPER e SMITH, 1981), o erro padrão da estimativa absoluto e em porcentagem (S_{yx} e $S_{yx} \%$) e o valor de F. Ao final das avaliações, a equação de melhor ajuste foi aplicada para ilustrar a variação da RP em função da Ds e U_g .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade, porosidade total e de aeração

A Tabela 2 apresenta os valores médios de densidade, porosidade total e de aeração (\pm desvio padrão) por classe de umidade gravimétrica e camada de solo. Com o aumento da umidade do solo, houve maior incremento na Ds ocasionado

pelo tráfego do *Feller buncher* e do *Skidder*. A maior diferença em D_s na situação AT em comparação à situação ST, na camada de 0,0 a 0,15 m, ocorreu na classe Ug_3 , com 18,9% de incremento. Da mesma maneira, na camada de 0,30 a 0,50 m, a condição Ug_3 foi que propiciou maior aumento em D_s devido ao tráfego das máquinas, com incremento de 4,7%. Já na camada de 0,15 a 0,30 m, o efeito do tráfego foi menor, podendo ser devido ao maior conteúdo de areia grossa e C-org desta camada, o que pode ter conferido maior resistência ao solo à ação do tráfego, porém, a maior diferença em D_s ocorreu de forma similar na classe Ug_3 , com 3,9% de incremento.

Ao comparar os aumentos de D_s entre as camadas, o incremento nas camadas mais profundas (0,15 a 0,30 e 0,30 a 0,50 m) foi, em média, 73,4% menor em relação à camada superficial do solo (0,0 a 0,15 m), indicando ser essa camada mais susceptível à compactação. Cullen et al. (1991) justificam esse fato devido à pressão aplicada pelo tráfego sobre o solo se dissipar, podendo, assim, a pressão não ser suficiente para impactar as propriedades físicas das camadas mais profundas em um nível considerável.

Além disso, para se entender o comportamento físico-mecânico do solo deve-se considerar o efeito da umidade, pois esta determina a proporção entre compactação e deformação plástica do solo após a aplicação de forças externas pelo tráfego das máquinas. Em condição de baixa umidade, há maior coesão entre as partículas do solo por não haver água suficiente para formar filmes sobre estas, assim, a compactação tende a não ser elevada. Conforme a umidade aumenta, os filmes de água sobre as partículas do solo expandem-se, dessa forma, a coesão entre as partículas diminui e a resistência do solo se torna menor às pressões externas, e, então, a deformação plástica passa a ser o processo dominante, resultando em corte e formação de sulcos no solo pelo rodado das máquinas. Em alta umidade, embora a compactação tenda a ser menor, pode ocorrer “fechamento” de poros e sua continuidade destruída, levando a problema em termos de infiltração de água e troca gasosas (GREACEN e SANDS, 1980; HILLEL, 1998; WILLIAMSON e NEILSEN, 2000; REICHERT et al., 2010).

Baseando-se que o incremento da densidade do solo acima 15% em relação à condição inicial potencialmente representa o nível no qual a compactação pode se tornar prejudicial ao crescimento radicular de plantas (LACEY e RYAN, 2000), pode se inferir que o tráfego das máquinas

causou efeitos significativos no solo, principalmente na camada de 0,0 a 0,15 m, onde o incremento da D_s na condição Ug_3 ultrapassou esse limite crítico. Nota-se que, apesar desse limite ter sido sugerido pelos autores para outras condições, o mesmo serve para efeito de comparação, uma vez que pequenas alterações na D_s podem acarretar em maiores consequências, como redução da porosidade e do fluxo de água no solo (OLIVEIRA et al., 2001).

A densidade apresenta-se relacionada às outras propriedades físicas do solo, tendo grande interação com o conteúdo de água, afetando as outras propriedades conforme as condições de umidade, assim, podendo gerar alta resistência mecânica à penetração e baixas condições de aeração (LETEY, 1985). Alta resistência do solo à penetração (≥ 2 MPa) (GREACEN e SANDS, 1980), pobre aeração (porosidade de aeração $\leq 10\%$) (ERICKSON, 1982), em conjunto com alta densidade do solo, são os fatores primários para a limitação do crescimento radicular. Nesse sentido, pode-se notar que o valor de D_s , em nenhuma situação excedeu o valor de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, que, de acordo com Jones (1983), seria outro valor crítico de D_s , nesse caso para solos de textura arenosa.

Por outro lado, utilizando para comparação o valor crítico baseado no Intervalo Hídrico Ótimo (D_{sc} IHO) e a D_s crítica restritiva baseada no crescimento radicular de algumas culturas (D_{sc} Rest), conforme Reichert et al. (2009), verificou-se que os valores de D_s observados sempre foram inferiores aos valores destes limites, sugerindo que, mesmo que tenha ocorrido alteração das propriedades físicas do solo após o tráfego das máquinas, ainda não foram atingidos os valores apontados na literatura como sendo críticos ao crescimento de plantas.

Em relação à Pt e à PA, as maiores alterações também ocorreram na camada de 0 a 15 cm, na qual a condição Ug_3 propiciou as maiores reduções de Pt e PA, respectivamente, na ordem de 13,1 e 52,2%. Nas camadas mais profundas isso se repetiu, onde a Pt e PA foram reduzidas em média, respectivamente, de 8,6 e 35,2%, em Ug_3 .

A redução da PA foi de maior magnitude comparada à Pt, mostrando que essa propriedade é sensível para identificar alterações na estrutura do solo. Segundo Ballard (2000), a redução do tamanho dos poros leva a uma maior retenção de água no solo e, por conseguinte, maior restrição às trocas gasosas que decorrem também pela diminuição da Pt. Além disso, em alguns momentos,

TABELA 2: Valores médios de densidade, porosidade total e de aeração (\pm desvio padrão) por classe de umidade gravimétrica e camada de solo.TABLE 2: Average values of bulk density, total and air-filled porosity (\pm standard deviation) by class of gravimetric moisture and soil depth.

Camada (m)	Valor F	Classe de Umidade Gravimétrica (kg kg ⁻¹)									D _s IHO	D _s Rest
		U _{g1} (U _g < 0,30)			U _{g2} (0,30 ≤ U _g < 0,40)			U _{g3} (U _g ≥ 0,40)				
Densidade do Solo (Mg m ⁻³)												
		D _s (AT)	D _s (ST)	ΔD _s (%)	D _s (AT)	D _s (ST)	ΔD _s (%)	D _s (AT)	D _s (ST)	ΔD _s (%)		
0,0 – 0,15	4,9*	1,38 (±0,09)	1,30 (±0,07)	5,7 ¹ b	1,30 (±0,04)	1,16 (±0,08)	10,8 ² ab	1,22 (±0,07)	0,99 (±0,24)	18,9 ³ a	1,68	1,75
0,15 – 0,30	8,8**	1,33 (±0,11)	1,31 (±0,11)	1,7 ⁴ b	1,29 (±0,05)	1,26 (±0,05)	1,9 ⁵ b	1,19 (±0,05)	1,13 (±0,05)	4,7 ⁶ a	1,66	1,73
0,30 – 0,50	3,2*	1,34 (±0,07)	1,33 (±0,04)	1,0 ⁷ b	1,28 (±0,06)	1,23 (±0,05)	3,9 ⁸ ab	1,21 (±0,04)	1,14 (±0,05)	5,7 ⁹ a	1,55	1,63
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)												
		Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt	Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt	Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt		
0,0 – 0,15	9,9**	0,41 (±0,04)	0,46 (±0,04)	-12,8 ¹ b	0,50 (±0,09)	0,47 (±0,03)	7,2 ² a	0,63 (±0,07)	0,55 (±0,04)	13,1 ³ a		
0,15 – 0,30	4,3*	0,42 (±0,05)	0,41 (±0,05)	2,6 ⁴ b	0,50 (±0,04)	0,48 (±0,04)	3,8 ⁵ ab	0,51 (±0,05)	0,46 (±0,05)	9,8 ⁶ a		
0,30 – 0,50	16,2**	0,45 (±0,01)	0,45 (±0,02)	0,3 ⁷ b	0,51 (±0,03)	0,48 (±0,04)	6,3 ⁸ b	0,56 (±0,03)	0,48 (±0,04)	14,5 ⁹ a		
Porosidade de Aeração (m ³ m ⁻³)												
		PA (ST)	PA (AT)	ΔPA	PA (ST)	PA (AT)	ΔPA	PA (ST)	PA (AT)	ΔPA		
0,0 – 0,15	22,2**	0,08 (±0,03)	0,07 (±0,03)	10,8 ¹ c	0,11 (±0,04)	0,07 (±0,03)	35,2 ² b	0,16 (±0,07)	0,08 (±0,06)	52,2 ³ a		
0,15 – 0,30	6,0**	0,06 (±0,02)	0,06 (±0,02)	4,5 ⁴ b	0,09 (±0,04)	0,06 (±0,03)	27,3 ⁵ ab	0,11 (±0,03)	0,07 (±0,03)	39,2 ⁸ a		
0,30 – 0,50	4,9*	0,05 (±0,01)	0,04 (±0,01)	9,8 ⁷ b	0,08 (±0,03)	0,05 (±0,04)	35,9 ⁸ a	0,10 (±0,02)	0,06 (±0,02)	38,4 ⁹ a		

Em que: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; Δ: diferença em porcentagem considerando situação após tráfego (AT) e sem tráfego (ST); 1 – média de 28 repetições pareadas; 2 – média de 50 repetições pareadas; 3 – média de 22 repetições pareadas; 4 – média de 26 repetições pareadas; 5 – média de 40 repetições pareadas; 6 – média de 34 repetições pareadas; 7 – média de 18 repetições pareadas; 8 – média de 52 repetições pareadas; 9 – média de 30 repetições pareadas.

mesmo nas situações ST, a PA foi menor que 0,10 m³ m⁻³, considerado o valor crítico no qual as plantas começam sofrer problemas de aeração (ERICKSON, 1982).

Resistência do solo à penetração

Como nos outros atributos físicos do solo, as maiores alterações da RP ocorreram na condição U_{g3}, estando mais acentuadas na camada superficial, com um incremento em torno de 35% na RP (Tabela

3). No restante do perfil de solo, as diferenças foram menores, havendo acréscimos na ordem de 15 a 20% na RP.

Em nenhuma das condições avaliadas, houve valores acima do considerado crítico (≥ 2 MPa) (GREACEN e SANDS, 1980) ao desenvolvimento radicular das plantas. Entretanto, apesar de não ser atingido tal valor, ocorreram incrementos significativos em RP em todas as classes de umidade analisadas e até nas camadas mais profundas do solo. Tal resultado pode sugerir

TABELA 3: Valores médios de resistência do solo à penetração (\pm desvio padrão) por classe de umidade gravimétrica e camada de solo.TABLE 3: Average values of soil penetration resistance (\pm standard deviation) per class of gravimetric moisture and soil depth.

Camada (m)	Valor F	Classe de Umidade Gravimétrica (kg kg ⁻¹)								
		Ug ₁ (Ug < 0,30)			Ug ₂ (0,30 ≤ Ug < 0,40)			Ug ₃ (Ug ≥ 0,40)		
Resistência do Solo à Penetração (MPa)										
		RP (AT)	RP (ST)	ΔRP ¹	RP (AT)	RP (ST)	ΔRP ²	RP (AT)	RP (ST)	ΔRP ³
0,0 – 0,10	24,7**	1,13 (±0,39)	0,89 (±0,38)	21,1 b	1,07 (±0,34)	0,70 (±0,35)	34,3 a	0,93 (±0,60)	0,52 (±0,61)	40,4 a
0,10 – 0,20	6,0**	1,36 (±0,34)	1,16 (±0,49)	14,6 b	1,33 (±0,21)	1,08 (±0,24)	18,6 b	1,33 (±0,24)	0,90 (±0,19)	23,6 a
0,20 – 0,30	8,5**	1,47 (±0,42)	1,24 (±0,39)	15,5 b	1,46 (±0,29)	1,22 (±0,29)	16,6 b	1,31 (±0,20)	0,96 (±0,17)	24,6 a
0,30 – 0,40	9,7**	1,43 (±0,20)	1,30 (±0,17)	8,9 b	1,42 (±0,24)	1,14 (±0,30)	20,8 a	1,18 (±0,30)	0,88 (±0,28)	23,3 a
0,40 – 0,50	98,8**	1,47 (±0,35)	1,37 (±0,35)	7,3 c	1,37 (±0,29)	1,14 (±0,29)	16,8 b	1,25 (±0,33)	0,90 (±0,33)	25,5 a
0,50 – 0,60	4,5*	1,62 (±0,65)	1,51 (±0,63)	6,6 b	1,52 (±0,43)	1,31 (±0,42)	13,6 ab	1,28 (±0,25)	1,03 (±0,23)	18,3 a
0,60 – 0,70	4,4*	1,75 (±0,65)	1,55 (±0,61)	11,2 a	1,62 (±0,48)	1,43 (±0,48)	12,1 a	1,45 (±0,42)	1,17 (±0,35)	17,3 a
0,70 – 0,80	0,2 ns	1,73 (±0,81)	1,47 (±0,79)	14,8	1,70 (±0,68)	1,42 (±0,68)	16,3	1,59 (±0,62)	1,28 (±0,51)	17,8

Em que: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; Δ: diferença em porcentagem considerando situação após tráfego (AT) e sem tráfego (ST); 1 – média de 24 repetições pareadas; 2 – média de 47 repetições pareadas; 3 – média de 29 repetições pareadas.

que as pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas estão acima da capacidade de suporte de carga do solo, mesmo em umidade baixa.

A umidade foi determinante na resposta do solo quando submetido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira. Isso pode ser observado devido às maiores alterações das propriedades físicas avaliadas terem ocorrido na condição Ug₃, quando o solo se encontrava próximo ao LL, sendo essa condição não recomendada para o tráfego de máquinas, pois o solo pode sofrer deformações não recuperáveis (KONDO e DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA, 2002; REICHERT et al., 2010). Na condição Ug₁, abaixo da CC, o tráfego das máquinas causou efeitos consideravelmente menores à estrutura do solo, mostrando, dessa maneira, uma condição de trafegabilidade sem que ocorram problemas acentuados de compactação. Entretanto, deve-se ressaltar também que, essa

condição apresentou maiores valores de densidade e menores de porosidade, e isso influenciou diretamente a resposta do solo à tensão aplicada pelo tráfego, uma vez que com maior densidade, mais compacto é o empacotamento das partículas do solo. E como consequência, maior será o número de pontos de contato entre as partículas, sendo também menor o tamanho médio dos poros, e como poros de menor dimensão tendem a ser menos propensos às forças compactantes, estes levam a uma maior resistência e capacidade de suporte de carga do solo, o que, parcialmente, protege o solo de compactação adicional (WILLIANSON e NEILSEN, 2000; SILVA e CABEDA, 2006).

Portando, de forma geral, confirma-se a necessidade de adoção de medidas, como o gerenciamento do tráfego conforme a umidade do solo, visando à redução dos efeitos da compactação. Assim, a degradação causada pelas operações de

colheita da madeira mecanizada sobre o solo e os consequentes custos e perdas de produtividade das futuras rotações poderão ser reduzidos.

Estimativa da resistência do solo à penetração

Verificando as avaliações estatísticas dos modelos comparados (Tabela 4), não houve diferenças acentuadas entre os modelos, sendo que o valor de R² aj variou de 0,57 a 0,61, o Syx variou de 0,228 a 0,239 MPa, o Syx (%) variou de 16,7 a 17,5% e o valor de F de 121,8 a 143,8. Dessa forma, em geral, infere-se que o MSLM obteve o melhor ajuste, seguido do MSAM, enquanto o primeiro e quarto modelos (MAVP e MBLA) foram os piores, tendo os menores R² aj e valor F e os maiores Syx e Syx (%).

Um dos prováveis motivos que levaram o MSLM a apresentar os melhores resultados reside no fato de que Ds e Ug podem estar relacionadas de forma não linear com a RP, como relatam Whalley et al. (2005). No entanto, pelos ajustes, percebe-se a possibilidade de haver outros fatores que influenciam na estimativa e determinação da RP, uma vez que é alta a variabilidade dessa propriedade em solos florestais, pois fatores de campo, como a presença de pedras e resíduos (galhos, cascas, acículas e etc.), e raízes das árvores e plantas do sub-bosque que se formou abaixo do povoamento, interferem na determinação desta propriedade, bem como de outras. Além disso, deve-se considerar que, durante as operações de colheita da madeira, geralmente, o tráfego das máquinas não atingem toda a área e, consequentemente, o grau de variação e a heterogeneidade da compactação e perturbação do solo é grande nas florestas (GREACEN e SANDS, 1980), devendo ser considerados esses

fatores quando se visa avaliar as condições físicas do solo e desenvolver equações de estimativa das propriedades ou pedofunções.

Por fim, aplicando-se o modelo de melhor ajuste (Figura 1), percebe-se a variação da RP estimada em função da Ug e Ds, com a diminuição da Ug e o aumento da Ds, ocorrem maiores valores de RP.

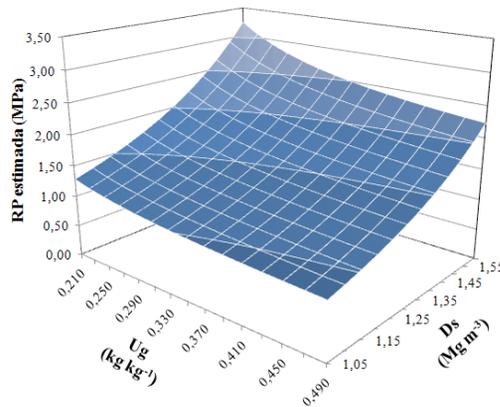


FIGURA 1: Resistência à penetração estimada (RP estimada) pelo MSLM em função da umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds).

FIGURE 1: Estimated penetration resistance (PR estimated) by MSLM as a function of the gravimetric water content (Ug) and bulk density (Ds).

CONCLUSÕES

O tráfego dos tratores florestais *Feller buncher* e *Skidder* causam alterações negativas em todos os parâmetros físicos do solo, havendo efeito

TABELA 4: Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração.

TABLE 4: Adjusted equations to estimate soil penetration resistance.

Modelo	Equações	R ² aj	Syx	Syx (%)	Valor F	N
MAVP	$RP = -0,86 + 2,29**Ds - 1,25**Ug$	0,57	0,239	17,5	121,8	186
MSAM	$RP = -0,34* + 0,91**Ds^2 + 0,03**Ug^{-2}$	0,59	0,232	17,0	135,1	186
MSLM	$\ln RP = -1,11** + 0,64**Ds^{-2} + 0,14**Ug^{-1}$	0,61	0,228	16,7	143,8	186
MBLA	$\ln RP = -0,60** - 0,43**\ln Ug + 1,95**\ln Ds$	0,59	0,232	17,0	134,9	186

Em que: *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; R² aj: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa em MPa; N: número de repetições; MAVP: Modelo Aritmético com Variáveis Puras; MSAM: Modelo por *stepwise* Aritmético com Variáveis Mistas; MSLM: Modelo por *stepwise* Logarítmico com variáveis mistas; MBLA: Modelo de Buscher (1990) Linearizado e Adaptado.

sobre todo o perfil até as camadas mais profundas (80 cm).

A deterioração física decorrente das operações de colheita florestal mecanizada é mais intensa na camada superficial do solo e em condição de maior umidade, apesar de os limites críticos para o crescimento das plantas sugeridos pela literatura, em geral, não terem sido ultrapassados.

Na situação de menor umidade do solo ($U_{g_1} < 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$), os efeitos do tráfego das máquinas sobre o solo são significativamente menores, sugerindo ser a melhor condição para realização das operações de colheita de madeira, evitando uma compactação do solo intensa e perdas de produtividade florestal.

Para a estimativa da resistência à penetração, o modelo por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) ($\ln RP = -1,11 + 0,64Ds^{-2} + 0,14Ug^{-1}$) mostra-se o melhor, mas deve haver cautela no seu emprego, devido à possibilidade de influência de fatores na estimativa e determinação da RP, como a presença de resíduos da colheita e raízes de plantas, além da alta variação e heterogeneidade inerente de solos florestais submetidos ao tráfego de máquinas de colheita da madeira.

AGRADECIMENTO

À CAPES pelo apoio financeiro e a empresa florestal pela cedência da área para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Part 2. Madison : ASA, 1965. p.1367-1378.

BALLARD, T. M. Impacts of forest management on northern forest soils. **Forest Ecology and Management**, v. 133, p. 37-42, 2000.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v. 3, p. 519-524, 1990.

CULLEN, S. J.; MONTAGNE, C.; FERGUSON, H. Timber harvest trafficking and soil compaction in Western Montana. **Soil Science Society American Journal**, v. 55, p. 1416-1421, 1991.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. USA: Decagon Devices, 2000. 70 p.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa

da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, p. 343-349, 2003.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2nd ed. New York, John and Wiley, 1981. 407 p.

EKWUE, E. I.; STONE, R. J. Organic matter effects on strength properties of compacted agricultural soils. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v. 38, p. 357-367, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. In: VAN DOREN, D. M.; ALLMARAS, R. R.; LINDEN, D. R.; WHISLER, F. D. **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, p.91-104, 1982.

FROELICH, H. A. Soil compaction: Why the controversy? **Logger handbook**, v. 37, p. 20-22, 1977.

GAPLAN. **Atlas de Santa Catarina**. Aerofoto Cruzeiro, 1986.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, p. 163-189, 1980.

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

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

LACEY, S. T.; RYAN, P. J. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 321-333, 2000.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p.277-294, 1985.

OLIVEIRA, J. O. A. P. et al. Influências de sistemas de preparo do solo na produtividade de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 443-450, 2001.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira

de Ciência do Solo, v. 5, p.49-134, 2007.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J. M. et al. Mecânica do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 29-102, 2010.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo- protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p.1931-1935, 2006.

SILVA, R.B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo Vermelho Distrófico Típico. II - Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002.

SOWERS, C.F. Consistency. In: BLACK C.A. **Methods of soil analysis**. Part 1. Madison : ASA, 1965. p.391-399

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. 1 ed. Reading, Massachusetts, v.1/3, 1977.

WHALLEY, W. R. et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 84, p. 18-27, 2005.

WILLIAMSON, J. R; NEILSEN, W. A. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground based harvesting. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p.1196-1205, 2000.