

JUDYSON DE MATOS OLIVEIRA

**IMPACTOS DO MANEJO FLORESTAL MECANIZADO SOBRE AS
PROPRIEDADES FÍSICAS DE LATOSSOLOS ARGILO-ARENOSOS**

Dissertação apresentada a
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48i
2018

Oliveira, Judyson de Matos, 1989-

Impactos do manejo florestal mecanizado sobre as
propriedades físicas de Latossolos argilo-arenosos / Judyson de
Matos Oliveira. – Viçosa, MG, 2018.
viii, 98 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2018.

Inclui bibliografia.

1. Física do solo. 2. Eucalipto. 3. Colheita. I. Oliveira,
Teógenes Senna de. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.43

JUDYSON DE MATOS OLIVEIRA

**IMPACTOS DO MANEJO FLORESTAL MECANIZADO SOBRE AS
PROPRIEDADES FÍSICAS DE LATOSSOLOS ARGILO-ARENOSOS**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2018.

Cássio Antônio Tormena

Gerson Rodrigues dos Santos
(Coorientador)

Igor Rodrigues de Assis

Teógenes Senna de Oliveira
(Orientador)

Ao meu saudoso avô Roque Avelino de Oliveira, nordestino, vaqueiro e acima de
tudo um forte!

Dedico

“Lembre-se: você é seu próprio general. Então, tome agora a iniciativa, planeje e
marche decidido para a vitória.”

Sun Tzu

AGRADECIMENTOS

A Jeová dos exércitos, mantenedor das minhas conquistas, dador da força, coragem e sabedoria.

A minha família, pela base familiar à qual devo o sucesso dessa jornada.

Ao Departamento de Solos da UFV, seu corpo docente e administrativo, que atuaram como facilitadores no sentido de viabilizar a realização do curso do mestrado.

Aos professores Teógenes Oliveira (orientador), Gerson Rodrigues, Raphael Fernandes (coorientadores) e Cássio Tormena, pelos ensinamentos, comprometimento e amizade.

Ao Prof. Francisco Alisson (ex. orientador), pelo apoio dado durante a graduação que foi crucial para o posterior ingresso no mestrado.

Ao Grupo de Estudos em Física e Manejo do Solo do DPS (GEFS), pelo apoio na realização das atividades de pesquisa.

Às equipes dos Laboratórios de Física do Solo da UFV e UEM, pela constância durante os trabalhos de pesquisa, em especial aos estagiários Joésio, Marlon e Isabela (UFV) e, aos amigos Hélio Henrique e Heitor Hohling (UEM), pela parceria no desenvolvimento dos trabalhos.

Aos irmãos de luta Danilo Silva e Rafael Farias, pelos dias em Viçosa que dedicamos ao trabalho, às farras e às demais vivências.

Aos amigos da Bahia do grupo “Fraternidade”, pela importante manutenção dos laços afetivos e às amigas de Viçosa, Maria Clara, Noele Leonardo e Geusa Maria, pelas horas compartilhadas.

Aos colegas de Departamento, Luiz Aníbal, Pedro Renato, Raíza Farias, Matheus, Jéssica Nunes e Marcel Thomas, pelo apoio e amizade durante nosso curso.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte do meu processo de formação, o meu **MUITO OBRIGADO!**

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REVISÃO DE LITERATURA	2
<i>Compactação do solo: conceitos e causas.....</i>	<i>2</i>
<i>Compactação do solo em sistemas florestais.....</i>	<i>4</i>
<i>Consequências da compactação para o sistema solo-planta</i>	<i>7</i>
<i>Crescimento e regeneração florestal</i>	<i>9</i>
<i>Métodos de avaliação da compactação do solo</i>	<i>10</i>
<i>Manejo da compactação em sistemas florestais</i>	<i>12</i>
REFERÊNCIAS.....	12
CAPÍTULO I.....	19
ALTERAÇÕES DE CURTO PRAZO NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE LATOSSOLO VERMELHO ARGILO-ARENOSO SOB MANEJO FLORESTAL MECANIZADO.....	19
RESUMO.....	19
ABSTRACT.....	21
INTRODUÇÃO	23
MATERIAL E MÉTODOS	26
<i>Características da área e descrição dos tratamentos.....</i>	<i>26</i>
<i>Amostragem de solo, medições de campo e análises de laboratório.....</i>	<i>30</i>
<i>Análise estatística</i>	<i>30</i>
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
<i>Manejo florestal mecanizado e resistência do solo à penetração</i>	<i>32</i>
<i>Avaliação do comportamento geoespacial da resistência do solo à penetração</i>	<i>39</i>
CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	45
CAPÍTULO II	52
ALTERAÇÕES DE CURTO PRAZO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARGILO-ARENOSO SOB MANEJO FLORESTAL MECANIZADO.....	52
RESUMO.....	52
ABSTRACT.....	54
INTRODUÇÃO	56
MATERIAL E MÉTODOS	59
<i>Características da área e descrição dos tratamentos.....</i>	<i>59</i>
<i>Amostragem e análises de solo</i>	<i>62</i>
<i>Análise estatística</i>	<i>64</i>
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
<i>Densidade do solo.....</i>	<i>65</i>
<i>Resistência do solo à penetração.....</i>	<i>69</i>
<i>Porosidade do solo</i>	<i>72</i>
<i>Permeabilidade do solo ao ar</i>	<i>76</i>
<i>Condutividade hidráulica em solo saturado.....</i>	<i>79</i>
<i>Pressão de pré-consolidação e grau de compactação do solo</i>	<i>81</i>
<i>Análise das correlações entre variáveis físicas</i>	<i>84</i>
CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS.....	91
CONCLUSÕES GERAIS.....	98

RESUMO

OLIVEIRA, Judyson de Matos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Impactos do manejo florestal mecanizado sobre as propriedades físicas de Latossolos argilo-arenosos.** Orientador: Teógenes Senna de Oliveira. Coorientadores: Gerson Rodrigues dos Santos e Raphael Bragança Alves Fernandes.

A mecanização do sistema de produção florestal contribui para obtenção de alta produtividade. Contudo, as práticas de manejo mecanizado promovem alterações edáficas, sobretudo sobre as propriedades físicas do solo, as quais precisam ser avaliadas para assegurar a sustentabilidade da atividade florestal a médio e longo-prazos. Objetivou-se avaliar os efeitos cumulativos do conjunto de operações florestais mecanizadas (colheita e preparo do solo) e sua atenuação por resíduos em superfície sobre as propriedades físicas do solo. O estudo foi realizado em fazenda da Klabin S/A em Telêmaco Borba - PR, Brasil, em área dominada por Latossolos Vermelhos distróficos argilo-arenosos. Os tratamentos consistiram de dois sistemas de colheita (harvester + forwarder - HF e feller + skidder - FS) em conjunto com a renovação do plantio (R), seguido do manejo de resíduos culturais em que 100%, 50% e 0% do total de resíduos produzidos na colheita foram mantidos, sendo seguido de preparo de solo, ou, então, pela condução do plantio colhido (C). Determinaram-se de forma sistemática em campo a resistência do solo à penetração (RP) (0-0,60m) e umidade gravimétrica do solo (U_{am}). Transectos de amostragem foram alocados perpendicularmente às linhas de plantio coletando-se amostras indeformadas em pontos equidistantes demarcados a cada 0,50 m. Densidade do solo (D_s), porosidade (macro, micro e total), resistência do solo à penetração (RP) e umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) foram determinadas nas amostras coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, enquanto a permeabilidade do solo ao ar (K_a), condutividade hidráulica em solo saturado (K_s), pressão de pré-consolidação (σ_p) e o grau de compactação (GC) foram nas camadas 0-0,30 e 0,30-0,60 m. Intervalos de confiança e correlações foram calculados considerando probabilidades de até 0,10 e 0,05, respectivamente. O comportamento geoespacial da RP foi avaliado por meio de análise geoestatística. A RP não apresentou dependência espacial nas camadas 0-0,20 e 0,40 m, sendo que, nas camadas 0,40-0,60 m, constatou-se dependência espacial fraca, para HF_R e FS_R . Esses resultados estão relacionados ao efeito do preparo de solo sobre o comportamento geoespacial da RP. Nas áreas de renovação, as médias (0-0,60 m) de D_s foram significativamente

menores em HF_{R0} (1,21 kg dm⁻³) e FS_{R0} (1,24 kg dm⁻³) em relação à HF_{R100} (1,40 kg dm⁻³). Nesse caso, o maior volume de resíduos em HF_{R100} contribuiu com esse resultado. Nas áreas de condução dos plantios, a média (0-0,60m) de Ds em HF_C (1,30 kg dm⁻³) foi significativamente menor em relação a FS_C (1,46 kg dm⁻³). Esse resultado está associado ao menor volume de resíduos sobre a superfície do solo durante a colheita em FS_C. Não foram constatadas diferenças significativas para as médias de RP em HF_R e FS_R. Porém, as médias (0-0,60 m) em HF_C (1,23 MPa) foram significativamente menores que em FS_C (2,00 MPa). Em poucas situações foram constatadas diferenças significativas para as médias de porosidade (macro, micro e total), K_s, K_a, GC e σ_p , contudo o comportamento geral dessas variáveis estiveram associados às alterações na Ds e, em análise conjunta, indicaram que os diferentes tipos de manejo adotados promoveram alterações na estrutura do solo, percebidas no curto prazo. Nas presentes condições, as maiores quantidades de resíduos sobre a superfície do solo atenuaram os efeitos degradantes do tráfego na colheita sobre a estrutura do solo e, em contrapartida, em áreas de renovação do plantio, as maiores quantidades de resíduos prejudicaram o resultado final do preparo de solo.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Judyson de Matos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Impacts of mechanized forest management on physical properties of clayey-sandy Oxisols.** Advisor: Teógenes Senna de Oliveira. Co-advisors: Gerson Rodrigues dos Santos and Raphael Bragança Alves Fernandes.

The mechanization of forest production system contributes to the achievement of high yield. However, the mechanized management practices promote edaphic changes, especially on the physical properties of the soil, which need to be evaluated to ensure the sustainability of the forestry activity within medium and long-term. The objective of this study was to evaluate the cumulative effects of mechanized forest operations (harvesting and soil tillage) and their attenuation by surface residues deposition on soil physical properties. The study was carried out on a Klabin S/A farm in Telêmaco Borba - PR, Brazil, in an area predominantly covered by Oxisols, with clayey-sand texture. Treatments consisted in two harvesting systems (harvester + forwarder - HF and feller + skidder - FS) with the forest renewal (R), followed by the management of cultural residues, in which 100%, 50% and 0% of the total residues produced at harvest were maintained, followed by soil tillage, or then by maintaining the harvested crop (C). The soil penetration resistance (PR) (0-0.60 m) in the field and soil moisture (U_{am}) were systematically determined. Sampling transects were allocated perpendicularly to the plant lines and samples were collected at equidistant points in intervals of 0.50 m. Bulk density (S_d), porosity (macro, micro and total), soil resistance to penetration (PR) and soil water content at field capacity (θ_{cc}) were determined in the samples collected in the layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.40 e 0.40-0.60 m, while soil air permeability (K_a), soil saturated hydraulic conductivity (K_s), pre-consolidation pressure (σ_p) and compaction level (GC) were obtained for 0-0.30 and 0.30-0.60 m layers. Confidence intervals and correlations were calculated considering probabilities of 0.10 and 0.05, respectively. The geospatial behavior of RP was evaluated through geostatistical analysis. The PR did not present spatial dependence in the 0-0.20 and 0.20-0.40 m layers, and within layers 0-0.40-0.60 m, weak spatial dependence was observed for HF_R and FS_R . These results are related to effect of the soil tillage on the geospatial behavior of PR. In the plantation renewing areas, the average (0-0.60 m) of S_d were significantly lower in HF_R0 (1.21 kg dm^{-3}) and FS_R0 (1.24 kg dm^{-3}) than in HF_R100 (1.40 kg dm^{-3}). In this case, the higher volume of residues in HF_R100 contributed the most to this result. In

areas maintaining forest, the average (0-0.60 m) of Sd in HF_C (1.30 kg dm⁻³) was significantly lower in relation to FS_C (1.46 kg dm⁻³). This result is associated to the lower volume of residue on the soil surface during FS_C harvesting. No significant difference was reported for the means of PR in HF_R and FS_R. However, the averages (0-0.60 m) of PR in HF_C (1.23 MPa) were significantly lower than in FS_C (2.00 MPa). In few situations, significant differences were observed for the porosity (micro, macro, and total), Ks, Ka, GC and σ_p means, however, the general behavior of these variables was associated with changes in Sd and, in a joint analysis, indicated that the different types of management adopted promoted changes in soil structure, perceived in the short-term. Under these conditions, the higher level of residue on soil surface attenuated the degrading effects of harvest traffic on soil structure. On the other hand, in areas of forest renewal, the higher level of residue impaired the final result of soil tillage.

INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, as florestas plantadas no Brasil ocupam 9,93 milhões de hectares, o que corresponde a apenas 1,2 % de todo o território nacional, sendo, contudo, responsáveis por 91 % de toda a madeira destinada à indústria no país. Estima-se que 6% do PIB brasileiro advinha do setor florestal (IBGE, 2016). Além da grande importância econômica para o país, o setor florestal tem se destacado por vários aspectos, sendo que dois deles merecem destaque e estão relacionados à redução do tempo de rotação (plantio a colheita), inferior a sete anos, e pela produtividade média de $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de eucalipto, porém com vários casos de áreas com produtividade acima $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (MENDES; BELING; TREICHEL, 2016). Tal condição tem levado a intensificação do uso da mecanização.

Os sistemas de manejo mecanizado oferecem opções práticas que podem reduzir os impactos negativos ocasionados sobre o solo, como, por exemplo, manejar os resíduos vegetais dentro e/ou fora do talhão. Fatores de ordem econômica e operacional (ou logística) podem interferir nas tomadas de decisão quanto a adoção da mecanização, não raramente sobrepondo-se às questões relacionadas aos impactos causados ao solo, colocando em risco a sustentabilidade da atividade florestal a médio e longo-prazos. Assim, torna-se imprescindível a avaliação das perturbações edáficas causadas pelo manejo mecanizado, sobretudo da compactação do solo, para assegurar a sustentabilidade dessa atividade.

Nesse contexto, considerando que o manejo florestal contínuo de uma mesma área, com práticas mecanizadas repetidas em ciclos de tempos menores podem levar a alterações cumulativas das propriedades físicas do solo, objetivou-se avaliar os impactos do conjunto práticas mecanizadas (colheita e preparo do solo) sobre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho argilo-arenoso e sua atenuação por resíduos em superfície em áreas de cultivo de eucalipto.

REVISÃO DE LITERATURA

Compactação do solo: conceitos e causas

A compactação do solo refere-se o processo de compressão (aumento da massa do solo por unidade de volume) causada por homens ou animais por meio da aplicação de forças externas que provocam a expulsão do ar do espaço poroso, resultando em um rearranjo mais denso das partículas sólidas e consequente aumento da densidade do solo (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000). As camadas compactadas formadas restringem fisicamente a penetração de raízes e a infiltração de água em profundidade variável, além de aumentar a susceptibilidade do solo à erosão (RAPER, 2005).

A facilidade com que o solo não saturado é compactado quando sujeito a pressões é denominada de compressibilidade, sendo governada por fatores externos e internos. Os fatores externos estão relacionados às características da força aplicada e a topografia da área, enquanto os internos são influenciados pelo histórico de tensões experimentadas pelo solo, pela densidade inicial do solo, a textura, a estrutura, os teores de matéria orgânica, mineralogia e o conteúdo de água atual do solo (BYGDÉN; ELIASSON; WÄSTERLUND, 2003; DEXTER, 2004).

A densidade do solo pode refletir o estado e a susceptibilidade do solo à compactação, pois quanto menor é a densidade do solo, mais este estará propenso a sofrer compactação adicional (WILLIAMSON; NEILSEN, 2000). Uma vez compactado, o solo é relativamente menos compressível devido à maior proporção de microporos em relação aos macroporos (AMPOORTER et al., 2007).

A textura do solo também é uma variável importante no processo de compactação. Solos de textura mais fina são mais susceptíveis à compactação quando comparados a solos de textura grossa (WÄSTERLUND, 1985), uma vez que esses solos retêm maior volume de água em relação aos arenosos e a água atua como lubrificante entre partículas facilitando a acomodação mais densa do solo. O conteúdo de água pode ser determinante na compactação, visto que o solo seco tem um alto grau de coesão e isso aumenta a resistência do solo à deformação. O aumento nos teores de água implica no aumento na compressibilidade do solo (HAN et al., 2006; MCDONALD; SEIXAS, 1997).

A compressibilidade do solo também depende da sua estrutura, especialmente da capacidade dos agregados do solo em suportarem a pressão sem que haja

rompimento (HAN et al., 2006). Diante disso, os agentes cimentantes que unem os agregados, tais como a matéria orgânica e os óxidos de Fe e Al, influenciam diretamente na compactação. A matéria orgânica do solo pode ser considerada como o principal agente cimentante em solos de regiões de clima temperado, principalmente nas camadas superficiais (ABDOLLAHI et al., 2014). Contudo, em solos tropicais, geralmente pobres em matéria orgânica, os óxidos de Fe e Al assumem maior importância na cimentação dos agregados ajudando a formar uma estrutura de solo com elevada resistência à compactação (FERREIRA et al., 2007).

O tráfego de máquinas e o revolvimento intensivo do solo são as causas mais comuns de compactação nos sistemas de produção agrícolas e/ou florestais. A pulverização dos agregados no preparo do solo facilita a acomodação das partículas/agregados em espaços menores promovendo a diminuição do volume, o que é intensificado com a compressão exercida pelo peso do maquinário e a exposição do solo ao impacto direto das gotas de chuva (AMPOORTER et al., 2007). A colheita e transporte também ocasionam compactação, pois há o tráfego pesado de máquinas nem sempre controlado.

As diferentes causas tornam a distribuição espacial da compactação e sua profundidade ao longo perfil bastante variável. Nos sistemas agrícolas há uma tendência da compactação ocorrer de maneira homogênea na área e superficial no perfil, devido ao tráfego ocorrer em área total e revolvimento concentrar-se nos primeiros 0,2 m do solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Porém, em solos florestais, a compactação torna-se bastante heterogênea na área e há tendência do aumento da profundidade de ocorrência (GREACEN; SANDS, 1980; HORN; VOSSBRINK; BECKER, 2004; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Dentre outros fatores, isso ocorre por conta do tipo de máquina utilizado, crescimento radicular e tráfego localizado nas operações de colheita e transporte (ARVIDSSON et al., 2001).

O crescimento do sistema radicular é outra possível causa natural de compactação, pois o crescimento da raiz provoca o aumento natural da densidade do solo na zona da interface solo-raiz podendo ocasionar compactação nessas regiões. A densidade do solo diminui exponencialmente com a distância da superfície das raízes, com um expoente que é um múltiplo constante do diâmetro radicular (DEXTER, 1987). Desse modo, a zona de compressão na interface solo-raiz exerce influência sobre propriedades do solo, como por exemplo, aeração e condutividade

hidráulica. Bruand et al. (1996), estudando as interações solo-raiz de uma cultivar de milho com auxílio da microscopia eletrônica e modelagem, constataram um aumento na densidade do solo de até 1,8 kg dm³ na região da interface solo-raiz. Aumentos significativos na densidade do solo podem ocorrer unicamente devido a elongação radicular, de modo que os valores absolutos são comparáveis à compactação induzida pelo tráfego de máquinas (ARAVENA et al., 2014). Porém, deve-se ressaltar que a expansão da raiz cria tensões e provoca fissuras e rachaduras no solo funcionando como uma espécie de escarificador natural, além de promover a formação de bioporos melhorando as condições físicas do solo (GAISER et al., 2013). Portanto, no contexto geral, os efeitos benéficos das raízes sobre as demais características do solo por vezes sobrepõem-se aos efeitos negativos sobre a densidade na zona de interação solo-raiz (CAMBI et al., 2017)

Compactação do solo em sistemas florestais

Em sistemas florestais inteiramente mecanizados, o tráfego intensivo de maquinário pesado começa desde a etapa de preparo do solo até colheita da última árvore do talhão, somando inúmeras entradas de máquinas na área ao final do processo de extração da madeira. Sem dúvida, a colheita é a etapa mais crítica em relação à qualidade física do solo, pois além da pressão exercida pelo maquinário, o tombamento das árvores sobre o solo eleva os riscos de compactação (MARCHI et al., 2016).

Dois principais sistemas de colheita têm sido utilizados no mundo, sendo o sistema de toras curtas (*Cut-to-length*) e o de toras longas (*Tree-Length*). No primeiro, as árvores são cortadas e processadas em toras curtas no local da derrubada, seguido do transporte para fora do talhão. No segundo, após o corte da árvore no local da derrubada, retiram-se apenas os galhos laterais e parte da extremidade apical, seguido do transporte para fora do talhão (MACHADO et al., 2002). De modo geral, no sistema de toras curtas utiliza-se maquinário do tipo *harvester* para o corte da árvore em toras de cerca de 2 m, seguido do maquinário do tipo *forwarder* que faz a retirada das toras de dentro do talhão. Ao conjunto dá-se a denominação “módulo *harvester* + *forwarder*”. Por sua vez, no sistema de toras longas utiliza-se maquinário do tipo *feller* para o corte das árvores retirando-se apenas a extremidade da árvore (corte da ponteira) no local da derrubada e em

seguida o maquinário do tipo *skidder* faz o arraste do tronco sobre o solo para fora do talhão. A esse conjunto de máquinas denomina-se “módulo *feller + skidder*”.

Os diferentes módulos de colheita permitem manejar os resíduos dentro e/ou fora dos talhões. Essa possibilidade é uma vantagem do ponto de vista estratégico do manejo, visto que a deposição de resíduos sobre o solo é fundamental para atenuar os impactos do tráfego de máquinas, porém, sua remoção para utilização como fonte de energia no setor industrial também é a opção do presente. De fato, os resíduos orgânicos possuem baixa densidade quando associado a alta susceptibilidade a deformações elásticas formando uma camada protetora que diminui o contato e pressão da máquina sobre a superfície do solo, ajudando a dissipar a pressão aplicada pelo peso do maquinário, diminuindo os riscos de compactação (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Nesse sentido, o módulo *harvester + forwarder* promove um maior acúmulo de resíduos na área, pois realiza o processamento das toras dentro do talhão, ao contrário do módulo *feller + skidder* cujo processamento é feito às margens dos carregadores ou no local de armazenamento definitivo.

Em detrimento aos benefícios operacionais oferecidos, o maquinário pesado utilizado em sistemas de colheita mecanizado causa uma série de perturbações sobre as propriedades físicas dos solos (ARES et al., 2005). Dentre as perturbações físicas ocasionadas, a compactação é considerada como a mais grave por desencadear outros distúrbios de ordem química, física e biológica. Diante disso, o estado de compactação tem sido um dos critérios utilizados para avaliar os impactos ambientais do tráfego de máquinas em ecossistemas florestais (CAMBI et al., 2017).

O aumento das tensões verticais e horizontais impostas ao solo pelo peso do maquinário causa-lhe compactação, com efeitos imediatos e/ou decorrentes sobre as propriedades do solo ao longo do tempo. A formação de sulcos profundos pelo rodado do maquinário, o revolvimento superficial do solo, a formação de poças d'água e a deposição localizada de resíduos vegetais, são indicativos visuais de compactação do solo no momento das operações (AGHERKAKLI; NAJAFI; SADEGHI, 2010).

Os efeitos decorrentes da compactação do solo podem persistir ao longo de décadas após a exploração florestal (CAMBI et al., 2017). Em um repovoamento florestal, Hattori et al. (2013) constataram que 20 anos após a exploração, as mudas implantadas apresentaram aumento na taxa de mortalidade em função do aumento da resistência à penetração no início do desenvolvimento (0-12 meses), e,

posteriormente (81 meses), o alongamento da raiz da principal foi inibido prejudicando o desenvolvimento das plantas.

A dimensão dos danos à estrutura depende dos fatores intrínsecos que governam a compressibilidade do solo (textura, mineralogia, teores de matéria orgânica e conteúdo de água), e, também de fatores extrínsecos que estão relacionados ao manejo (AMPOORTER et al., 2007). Os últimos envolvem as características do maquinário utilizado e do terreno, tais como: tipo e massa dos veículos, número de eixos, área de contato do pneu com o solo, frequência do tráfego e declividade do terreno (AMPOORTER et al., 2007; BYGDÉN; ELIASSON; WÄSTERLUND, 2003).

A pressão aplicada sobre o solo pelo rodado do maquinário utilizado aumenta juntamente com o seu tamanho e capacidade de carga. Em sistemas de exploração madeireira, os impactos causados nos solos pelo *forwarder* foram maiores que os ocasionados pelo *harvester*. Em condições de solo muito úmido, as deformações causadas pelo tráfego do *forwarder* tornaram-se ainda mais graves, com efeitos potenciais sobre as condições físicas e o crescimento das árvores (WRONSKI; HUMPHREYS, 1994).

A frequência do tráfego é outra variável do manejo que afeta o grau de compactação do solo. O aumento do número de passagens do maquinário eleva os riscos de compactação adicional a ponto de exceder os limites críticos para crescimento das plantas (AMPOORTER et al., 2007; JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014; SCHAEFER; SOHNS, 1993; WILLIAMSON; NEILSEN, 2000). Terrenos declivosos geralmente experimentaram maior compactação do solo com o aumento do número de passadas em relação a áreas de declives suaves, operações mecanizadas de corte em áreas com mais de 20% de declividade devem ser evitadas, sempre que possível, afim de reduzir os riscos de compactação do solo (JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014; NAGHDI; SOLGI; ILSTEDT, 2016).

O número de passagens das máquinas também afeta a distribuição espacial da compactação em sistemas florestais. O tráfego localizado nas operações de colheita e transporte aumenta a variabilidade espacial da compactação do solo devido à diferença de frequência com que uma determinada área é trafegada em relação à outra (ARVIDSSON et al., 2001). Rastreamento o movimento de um *skidder* utilizado na colheita florestal, verificou-se que os aumentos na resistência a penetração nos

primeiros 0,15 m na área trafegada pós-colheita variaram de 81% a 272% (ZENNER; BERGER, 2008).

Há uma tendência da compactação do solo diminuir com aumento da profundidade devido à dissipação da força aplicada pelo peso do maquinário. Porém, os altos teores de umidade no momento das operações em conjunto com as tensões induzidas pelo tráfego de máquinas acima da capacidade de suporte de carga do subsolo podem causar compactação de camadas abaixo de 0,50 m de profundidade (ALAKUKKU et al., 2003). Diante disso, a heterogeneidade e a profundidade da compactação em áreas florestais faz com que as medidas de controle e correção sejam ainda mais complexas que em áreas agrícolas ou pastagens (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SOANE et al., 1981).

Consequências da compactação para o sistema solo-planta

Os efeitos da compactação do solo sobre suas propriedades podem ser percebidos por meio de sua influência no funcionamento dos sistemas de cultivo. Os danos causados a continuidade de poros, por exemplo, afetam os mecanismos de transporte e as taxas de mineralização da matéria orgânica do solo, afetando o transporte e quantidade de nutrientes em solução (BERISSO et al., 2012). Em sistema florestal mecanizado, o aumento na densidade do solo em 60%, em média, nas áreas trafegadas, provocou a diminuição de 38% do C e 57%, 25%, 31%, respectivamente nas concentrações de N, P e K (NAGHDI; SOLGI; ILSTEDT, 2016).

Processos biológicos conduzidos pela macro e microfauna do solo, tais como a formação de macroporos e a humificação da matéria orgânica também são afetados pela compactação do solo (JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014). Há uma interdependência entre os processos biológicos do solo e a sua compactação, pois a última afeta a biodiversidade, enquanto simultaneamente os organismos do solo podem causar a sua redução (BEYLICH et al., 2010). Contudo, os efeitos da compactação concentram-se principalmente nas propriedades físicas do solo. Essas alterações incluem: aumento da densidade do solo e da resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes, bem como a redução no volume de macroporos, na infiltração, no movimento de água no solo e no fluxo interno de ar no solo (CAMBI et al., 2017; MCQUEEN; SHEPHERD, 2002; NAJAFI; SOLGI; SADEGHI, 2009).

Em um sistema de colheita florestal semi-mecanizado, uma operação de baldeio ocasionou um incremento médio na densidade do solo de $0,23 \text{ kg dm}^{-3}$ (28%), o que resultou em um aumento médio da resistência à penetração de $0,17 \text{ MPa}$ (147%) na camada superficial do solo das áreas trafegadas em relação as não trafegadas (MARCHI et al., 2016). Também, após algumas passagens de um trator carregador (potência de 47cv e massa de 2.540 kg), houve um aumento de 27% na densidade do solo, o que refletiu em um aumento de 46% na resistência a penetração do solo e diminuição de 11% na porosidade (CAMBI et al., 2017). Incrementos acima de 15 % nos valores de densidade inicial do solo podem ser considerados como limite crítico ao desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais (GEIST; HAZARD; SEIDEL, 1989).

Quanto à redução da porosidade devido à compactação do solo, essa ocorre principalmente à custas da macroporosidade que é funcional na drenagem da água e, por sua vez, a microporosidade é pouco afetada ou até mesmo aumentada pela compactação (AMPOORTER et al., 2007). A maioria dos fenômenos físicos do solo ocorrem no espaço poroso ocupado por ar. Um volume de poros abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é considerado como limite crítico para o desenvolvimento das plantas (LIPIEC; HATANO, 2003; SCHJØNNING et al., 2003). Em um ensaio de compactação utilizando um trator-carregador, Obour et al. (2016) observaram que os valores de porosidade foram reduzindo ao longo dos quatro anos de ensaio até atingirem valores abaixo do nível crítico (10%), resultando em danos drásticos às características dos poros do subsolo.

Devido a maior proporção de microporos, os solos compactados podem reter mais água à capacidade de campo, em relação aos não compactados. Porém, isso não implica em maior disponibilidade de água, visto que parte dessa água encontra-se retida a altas tensões em microporos extremamente finos, impossibilitando a absorção pelas raízes das plantas (WEERT, 1974). Além disso, a redução da macroporosidade afeta a drenagem do solo, provocando aumento do escoamento superficial, o que pode desencadear processos erosivos que comprometem a qualidade do solo (ZIMMERMANN; ELSENBEER, 2009).

Todavia, além da distribuição por tamanho, a compactação afeta a continuidade de poros prejudicando os fluxos de ar e água. Esses efeitos na dinâmica da relação solo-água podem ser observados pela diminuição da taxa de infiltração, redução da condutividade hidráulica e diminuição da disponibilidade de água para

planta em solos compactados (BERISSO et al., 2012; FREY et al., 2009; NADEZHDINA et al., 2012). É importante ressaltar que o fluxo de água no solo é essencial no transporte de nutrientes para as plantas, portanto, distúrbios dessa natureza comprometem não só a qualidade física do solo como também a nutrição das plantas.

Crescimento e regeneração florestal

O estado de desenvolvimento das plantas pode indicar problemas de compactação do solo, pois alguns sintomas são relatados como: variações no tamanho das plantas, folhas amareladas, sistema radicular raso e horizontal e raízes tortuosas ou com má formação (DIAS JÚNIOR, 2000). Destacadamente o sistema radicular é o primeiro componente da planta a refletir os efeitos da compactação, pois o aumento da densidade do solo compromete o desenvolvimento das raízes adventícias, causando diminuição da taxa de absorção de água e nutrientes. O déficit hídrico e nutricional provoca disfunções de ordem fisiológicas, diminuindo a fotossíntese líquida e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (GAERTIG et al., 2002).

Quando a compactação do solo ultrapassa os limites críticos para o desenvolvimento das plantas, o crescimento das raízes é inibido induzindo a mortalidade das mudas, conseqüentemente comprometendo o repovoamento de áreas florestais. Reduzir o nível de perturbação por meio do tráfego controlado pode diminuir os impactos do tráfego sobre o repovoamento e regeneração florestal. Pinard; Barker; Tay (2000), constataram que quatro anos após a exploração madeireira, a recuperação das plantas nas áreas onde o impacto pelo manejo foi reduzido foi melhor que nas áreas de manejo convencional.

Contudo, também há a situações onde a compactação do solo superficial beneficia a regeneração florestal. Em condições de solo com horizonte orgânico muito espesso o acesso das raízes aos nutrientes nas camadas mais profundas pode ser limitado, nesse caso, a compactação reduz a espessura do horizonte orgânico superficial permitindo a aproximação da zona de absorção das raízes com horizontes subsuperficiais (LÖF et al., 2012). A regeneração florestal pode ser melhor em áreas trafegadas em relação às não trafegadas nos primeiros anos após a colheita, devido ao aumento na retenção de água disponível para planta, provocado pelo aumento da

densidade do solo, situação mais comum em solos arenosos ou de estrutura granular em que a retenção de água não é tão efetiva (ARES et al., 2005).

Métodos de avaliação da compactação do solo

A qualidade do solo é avaliada por meio dos seus atributos químicos, físicos e biológicos. Assim, os atributos físicos refletem o estado de degradação física em que um determinado solo se encontra, portanto podem ser utilizados como indicadores da qualidade física do solo (DEXTER, 2004). Nesse sentido, os mais utilizados para avaliar o comportamento físico do solo são: densidade do solo, resistência do solo à penetração, porosidade e estrutura do solo. Todavia, o grande desafio atual da pesquisa é identificar os atributos com maior sensibilidade frente às mudanças no manejo, no curto prazo, para subsidiar a tomada de decisões nos sistemas agrícolas.

A densidade do solo, também chamada de densidade aparente ou global, é definida pela razão entre massa de sólidos e volume total do solo (volume de sólidos mais volume de poros ocupado por água e ar), sendo expressa em kg dm^{-3} de solo (BLAKE; HARTGE, 1986). É um parâmetro útil para expressar os efeitos da compactação do solo, pois representa o grau de impedimento mecânico que restringe o crescimento do sistema radicular (BLAKE; HARTGE, 1986; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000).

A densidade do solo reflete aspectos do sistema poroso, de forma que o aumento da densidade do solo é inversamente proporcional à porosidade total do solo. Porém, as características da rede de poros também é dependente da estrutura do solo, textura, teor de matéria orgânica e mineralogia. Em última análise, a densidade do solo é essencial na avaliação dos efeitos da compactação, porém, devido a influência de outros fatores que afetam as características físicas do solo, esse parâmetro não deve ser utilizado isoladamente como um indicador do estado de compactação do solo (HORN; VOSSBRINK; BECKER, 2004; MCQUEEN; SHEPHERD, 2002; NADERI-BOLDAJI et al., 2016).

Em alternativa a densidade do solo, tem-se proposto a medida da densidade relativa do solo, também chamada de grau de compactação quando expressa em percentagem, a qual relaciona a densidade do solo com uma densidade referência (HÅKANSSON, 1990; NADERI-BOLDAJI et al., 2016). Considera-se como densidade referência o valor máximo de densidade que um solo é capaz de atingir sob dada condição de umidade e aplicação de tensão padronizada (PROCTOR,

1933). Para a obtenção da densidade referência, dois métodos são mais utilizados, dentre outros citados na literatura, sendo estes: o ensaio de Proctor, que utiliza amostras de solo estrutura não preservada (CARTER, 1990; NADERI-BOLDAJI et al., 2016) e o teste uniaxial com a aplicação de uma pressão acima de 1.600 kPa em amostras de solo com estrutura preservada ou 200 kPa em amostras com estrutura não preservada (ARTHUR et al., 2013; DIAS JUNIOR et al., 2005). A utilização de densidade relativa visa normalizar a densidade atual do solo de tal modo que um determinado valor de densidade relativa descreve o mesmo estado de compactidade em qualquer solo, isto é, independentemente da textura do solo (NADERI-BOLDAJI et al., 2016). Assim, a densidade relativa pode ser usada para comparações entre diferentes tipos de solo.

Outro parâmetro comumente relacionado ao estado de compactação do solo é a resistência à penetração. Essa é definida como a força contrária que a matriz do solo exerce à penetração das raízes. O ensaio de penetração pode ser estático (o penetrômetro é empurrado firmemente no solo) ou dinâmico (a penetração é feita com o auxílio de um martelo ou por queda de peso) (DAVIDSON, 1965). No laboratório, a resistência à penetração é determinada por meio de penetrômetros de bancada e, em campo, pode ser determinada com o auxílio de penetrômetros automáticos ou de impacto. Os resultados das medições são expressos em unidades de pressão ou a força por unidade de área (kg cm^{-2} , PSI, Kpa ou MPa) (DAVIDSON, 1965; MORAES et al., 2014).

Apesar da relativa facilidade na determinação, as medições da resistência à penetração são fortemente influenciadas pelos teores de umidade do solo, densidade e textura do solo (VAZ et al., 2011). Isso implica que, para uma determinada densidade do solo, a resistência do solo diminui com o aumento da umidade do solo e, para uma determinada umidade do solo, a resistência do solo aumenta com o aumento da densidade do solo. Ainda, solos de textura fina com baixos teores de umidade apresentam alta resistência à penetração em relação a solos de textura grossa com o mesmo teor de umidade. Portanto, as medições de resistência à penetração devem ser acompanhadas das médias de umidade e/ou densidade do solo, para que esses parâmetros possam ser utilizados em modelos matemáticos como variáveis empíricas para o ajuste dos valores de resistência (BUSSCHER, 1990; VAZ et al., 2011).

Manejo da compactação em sistemas florestais

Nos sistemas de cultivo em geral, a prevenção da compactação do solo no momento das operações deve ser preferida em relação de correção. Em sistemas florestais, os efeitos da compactação podem persistir ao longo do tempo, as práticas de mitigação são onerosas e requerem um esforço mecânico muito grande por parte das máquinas (EBELING; LANG; GAERTIG, 2016). As operações mecanizadas mais utilizadas para a correção da compactação do solo são a escarificação, aração, gradagem e a subsolagem. A última é a mais utilizada em sistemas florestais, isso por conta da profundidade de trabalho da haste do subsolador que pode atingir até 1,0 m, criando condições físicas necessárias para o aprofundamento de raízes arbóreas. As operações de correção devem ser realizadas sob condições ideais de umidade do solo, para evitar que a haste (ou disco) do equipamento utilizado forme uma camada compactada em profundidade na interface haste-solo.

A implantação de espécies tolerantes à compactação também pode ser uma alternativa eficiente de mitigação da compactação do solo. Trabalhos de recuperação de solos compactados destacam que plantas tolerantes possuem sistema radicular bastante agressivo que imprimem pressões no solo ao ponto de romper as camadas compactadas (MEYER; LÜSCHER; SCHULIN, 2014).

Identificando os locais críticos e de maior susceptibilidade a compactação é possível realizar o manejo específico, considerando apenas a área afetada. Isso pode diminuir substancialmente os custos operacionais com recuperação de áreas compactadas. Nesse sentido, os estudos de compactação associada a sua distribuição espacial ainda são incipientes e lacunas metodológicas ainda precisam ser preenchidas, principalmente sobre quais indicadores da qualidade física do solo são mais sensíveis a essa variação e sobre as formas de amostragem da área que possam garantir baixo custo e boa precisão das estimativas.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, L. et al. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 28–37, 2014.

AGHERKAKLI, B.; NAJAFI, A.; SADEGHI, S. H. Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. **Journal of**

Forest Science, v. 56, n. 6, p. 278–284, 2010.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v. 73, n. 1–2, p. 145–160, 2003.

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

ARAVENA, J. E. et al. Quantifying coupled deformation and water flow in the rhizosphere using X-ray microtomography and numerical simulations. **Plant and Soil**, v. 376, p. 95–110, 2014.

ARES, A. et al. Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-fir growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1822–1832, 2005.

ARTHUR, E. et al. Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. **Geoderma**, v. 193–194, p. 236–245, 2013.

ARVIDSSON, J. et al. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 60, n. 1–2, p. 79–89, 2001.

BERISSO, F. E. et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 122, p. 42–51, 2012.

BEYLICH, A. et al. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 133–143, 2010.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 75–363.

BRUAND, A. et al. Backscattered Electron Scanning Images of Soil Porosity for Analyzing Soil Compaction around Roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 3, p. 895, 1996.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 519–524, 1990.

BYGDÉN, G.; ELIASSON, L.; WÄSTERLUND, I. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. **Journal of Terramechanics**, v. 40, n. 3, p. 179–190, 2003.

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

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canada Journal Soil Science**, p. 425–433, 1990.

DAVIDSON, D. T. Penetrometer measurements. In: BLACK, C. A. et al. (Eds.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical proprieties, including Statistics of Measurement and Sampling**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1965. p. 472–484.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004.

DEXTER, A. R. Compression of soil around roots. **Plant and Soil**, v. 97, p. 401–406, 1987.

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

DIAS JÚNIOR, M. DE S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 3. ed. Viçosa:

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 55–94.

EBELING, C.; LANG, F.; GAERTIG, T. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 74–82, 2016.

FERREIRA, F. P. et al. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 381–388, 2007.

FREY, B. et al. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. **European Journal of Soil Biology**, v. 45, n. 4, p. 312–320, 2009.

GAERTIG, T. et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 159, n. 1–2, p. 15–25, 2002.

GAISER, T. et al. Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation. **Ecological Modelling**, v. 256, p. 6–15, 2013.

GEIST, J. M.; HAZARD, J. W.; SEIDEL, K. W. Assessing Physical Conditions of some Pacific Northwest Volcanic Ash Soils After Forest Harvest. **Soil Science Society of America**, v. 53, p. 946–950, 1989.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, n. 2, p. 163–189, 1980.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 105–120, 1990.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71–85, 2000.

HAN, H. et al. Effects of slash, machine passes, and soil moisture on penetration Resistance in a cut-to-length harvesting. **International Journal of Forest Engineering**, v. 17, n. 2, p. 11–24, 2006.

HATTORI, D. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 770–776, 2013.

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

JAAFARI, A.; NAJAFI, A.; ZENNER, E. K. Ground-based skidder traffic changes chemical soil properties in a mountainous Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest in Iran. **Journal of Terramechanics**, v. 55, p. 39–46, 2014.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 107–136, 2003.

LÖF, M. et al. Mechanical site preparation for forest restoration. **New Forests**, v. 43, n. 5–6, p. 825–848, 2012.

MACHADO, C. et al. Análise de custos de subsistemas de colheita de toras de eucalipto de diferentes comprimentos e volumes por árvore. **Revista Árvore**, v. 26, p. 73–81, 2002.

MARCHI, E. et al. Impact of silvicultural treatment and forest operation on soil and regeneration in Mediterranean Turkey oak (*Quercus cerris* L.) coppice with standards. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 475–484, 2016.

MCDONALD, T. P.; SEIXAS, F. Effect of slash on forwarder soil compaction. **Journal of Forest Engineering**, v. 8, n. 2, p. 15–26, 1997.

MCQUEEN, D.; SHEPHERD, T. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 63, n. 3–4, p. 93–107, 2002.

MEYER, C.; LÜSCHER, P.; SCHULIN, R. Recovery of forest soil from compaction in skid tracks planted with black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 7–16, 2014.

MORAES, M. T. DE et al. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179–193, 2014.

NADERI-BOLDAJI, M. et al. Predicting the relative density from on-the-go horizontal penetrometer measurements at some arable top soils in Northern Switzerland. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 23–32, 2016.

NADEZHDINA, N. et al. Spruce roots under heavy machinery loading in two different soil types. **Forest Ecology and Management**, v. 282, p. 46–52, 2012.

NAGHDI, R.; SOLGI, A.; ILSTEDT, U. Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. **Geoderma**, v. 265, p. 12–18, 2016.

NAJAFI, A.; SOLGI, A.; SADEGHI, S. H. Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 165–169, 2009.

OBOUR, P. B. et al. Subsoil compaction assessed by visual evaluation and laboratory methods. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 4–14, 2016.

PINARD, M. A.; BARKER, M. G.; TAY, J. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 130, n. 1–3, p. 213–225, 2000.

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. **Engineering News Record**, p. 245–48, 1933.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3–4, p. 259–280, 2005.

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: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49–134.

SCHAEFER, T.; SOHNS, D. Reduction of soil compaction by covering soil with

brushwood. **Allgemeine Forst Zeitschrift fuer Waldwirtschaft und Umweltvorsorge**, p. 452–455, 1993.

SCHJØNNING, P. et al. Linking Soil Microbial Activity to Water- and Air-Phase Contents and Diffusivities. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 1, p. 156, 2003.

SOANE, B. D. et al. Compaction by agricultural vehicles: A review I. Soil and wheel characteristics. **Soil and Tillage Research**, v. 1, p. 207–237, 1981.

VAZ, C. M. P. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

WÄSTERLUND, I. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and scots pine. **Forest Ecology and Management**, v. 11, n. 3, p. 171–189, 1985.

WEERT, R. VAN DER. Influence of mechanical forest clearing on soil conditions and the resulting effects on root growth. **Tropical Agriculture**, 1974.

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, n. 8, p. 1196–1205, 2000.

WRONSKI, E. B.; HUMPHREYS, N. A Method for Evaluating the Cumulative Impact of Ground- Based Logging Systems on Soils. **Journal of Forest Engineering**, v. 5, n. 2, p. 9–20, 1994.

ZENNER, E. K.; BERGER, A. L. Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 10, p. 1785–1794, 2008.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H. The near-surface hydrological consequences of disturbance and recovery: A simulation study. **Journal of Hydrology**, v. 364, n. 1–2, p. 115–127, 2009.

CAPÍTULO I

ALTERAÇÕES DE CURTO PRAZO NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE LATOSSOLO VERMELHO ARGILO-ARENOSO SOB MANEJO FLORESTAL MECANIZADO

RESUMO

O uso da mecanização otimiza os sistemas de produção florestal, contudo, as práticas de manejo adotadas podem elevar ou reduzir os riscos de compactação do solo. Assim, torna-se imprescindível uma avaliação das alterações edáficas causadas pelos diferentes tipos de manejo mecanizado, para assegurar a sustentabilidade da atividade florestal a médio e longo-prazo. Objetivou-se avaliar os efeitos cumulativos do conjunto de operações florestais mecanizadas (colheita e preparo do solo) sobre a resistência do solo à penetração (RP) e sua atenuação por resíduos culturais em superfície. O estudo foi realizado em fazenda da Klabin S/A em Telêmaco Borba - PR, Brasil, em área dominada por Latossolos Vermelhos argilo-arenosos. Os tratamentos consistiram de dois sistemas de colheita (harvester + forwarder - HF e feller + skidder - FS) em conjunto com a renovação do plantio (R) ou a condução do plantio colhido (C). Na renovação do plantio, resíduos culturais foram mantidos sobre a superfície nas proporções de 100%, 50% e 0% do total de resíduos produzidos na colheita. A avaliação da RP foi realizada “*in situ*” utilizando penetrômetro eletrônico digital até a profundidade de 0,60m, seguindo esquema de amostragem sistematizada com pontos coletados nos vértices de triângulos isósceles distribuídos em rede (225m²), totalizando 22 pontos por tratamento com leituras em quadruplicatas. O grid formado pelo total de pontos (n=66) coletados nas áreas de renovação do plantio em cada sistema de colheita foi utilizado na avaliação do comportamento geoespacial da RP. Amostras deformadas para determinação da umidade gravimétrica (U_{am}) foram coletadas nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em 50% do total dos pontos de RP de cada tratamento. Intervalos de confiança para as médias de RP ($p < 0,10$) foram utilizados na avaliação das diferenças estatísticas dos dados nas diversas situações. Na análise geoestatística foram calculadas as semivariâncias e os parâmetros obtidos foram utilizados no cálculo do avaliador da dependência espacial (ADE). Também, utilizando técnicas da estatística clássica, foi determinado o número ideal de amostras em função do erro relativo em torno da média. A U_{am} apresentou médias gerais de 0,22 e 0,24 kg kg⁻¹

em HF e FS, respectivamente, e não houve correlação significativa com RP, denotando a pouca influência da U_{am} sobre RP. Nas áreas sob renovação do plantio e manejo de resíduos, a RP apresentou médias gerais (0-0,60m) de $1,19 \pm 0,16$ e $1,18 \pm 0,14$ MPa para HF_R e FS_R , respectivamente, não tendo sido constatadas diferenças significativas entre tratamentos. Já as áreas de condução do plantio apresentaram médias (0-0,60m) de $2,08 \pm 0,25$ e $1,91 \pm 0,20$ MPa para HF_C e FS_C , respectivamente e, também, não houve diferenças significativas entre tratamentos. A RP nas camadas superficiais (0-0,20 e 0,20-0,40 m) apresentou efeito pepita puro, em ambos sistemas de colheita (HF e FS). Apenas na camada 0,40-0,60 m, a variável apresentou dependência espacial fraca, com ADE de 90,50% e 72,77%, para HF e FS, respectivamente. A fraca dependência espacial, bem como a sua ausência estão relacionadas aos efeitos do preparo de solo sobre o comportamento espacial da RP. Em curto prazo não foi identificado influência do manejo de resíduos realizado antes do preparo de solo atual sobre a RP. O preparo de solo também reduziu drasticamente a dependência espacial da RP, inviabilizando o uso de técnicas de mapeamento da geoestatística.

Palavras-chave: Eucalipto, colheita, preparo do solo, resíduos culturais, propriedades físicas, geoestatística.

SHORT TERM CHANGES IN THE PENETRATION RESISTANCE OF A CLAYEY-SANDY OXISOL UNDER MECHANIZED FOREST MANAGEMENT

ABSTRACT

The use of mechanization optimizes forest production systems, however, the management practices adopted can increase or reduce the risks of soil compaction. Thus, it is essential to evaluate the soil changes caused by the different types of mechanized management, to ensure the sustainability of forestry activity in the medium and long term. The objective of this study was to evaluate the cumulative effects of mechanized forest operations (harvesting and soil tillage) on soil penetration resistance (PR) and its attenuation by surface cultural residues. The study was carried out on a Klabin S/A farm in Telêmaco Borba - PR, Brazil, in an area predominantly covered by Oxisols with clayey-sand texture. Treatments consisted of two harvest systems (harvester + forwarder - HF and feller + skidder - FS) together with the renewal of the forest (R) or the maintaining the forest harvested (C). At forest renewal, crop residues were kept on the surface at the proportions of 100%, 50% and 0% of the total residues produced at harvest. An in situ PR evaluation was performed using a digital electronic penetrometer up to a depth of 0.60 m, followed by a systematized sampling scheme with points collected at the vertices of isosceles triangles distributed in a network of 225 m² each, totaling 22 points per treatment and with quadruplicate readings. Grid formed by total number of points (n = 66) collected in the forest renewal areas in each harvesting system was used to evaluate the RP geospatial behavior. Deformed samples for determination of gravimetric moisture (U_{am}) were collected between the 0-0.20, 0.20-0.40 and 0.40-0.60 m layers, in 50% of the total PR points, in each treatment. Confidence intervals ($p < 0.10$) were used to evaluate the statistical differences of the data in the different situations. In the geostatistical analysis, the calculations of the semivariance were performed and the parameters obtained were used at the calculation of the space dependency assessor (SDA). Also, by means of classical statistics the ideal number of samples was determined as a function of the relative error around the average. The U_{am} presented an overall mean of 0.22 and 0.24 kg kg⁻¹, respectively in HF and FS and there was no significant correlation with PR, denoted the low influence of the U_{am} on the PR measures. In the areas under forest renewal and waste management, PR presented a general (0-0.60 m) average of 1.19 ± 0.16 and 1.18 ± 0.14 MPa, respectively, for

HF_R and FS_R and, significant differences between treatments were not found. Areas maintaining forest showed an average (0-0.60 m) of 2.08 ± 0.25 and 1.91 ± 0.20 MPa, respectively for HF_C and FS_C, and also, no significant difference was observed between treatments. The PR in the superficial layers (0-0.20 and 0.40 m) showed pure nugget effect, in both cropping systems only in the layers 0.40-0.60 m, the variable had present spatial dependence, with SDA of 90, 50% and 72.77%, respectively for HF_R and FS_R. The weak spatial dependence, as well as its absence, are related to the effect of soil tillage on the spatial behavior of RP. In the short term, no influence of the residue management performed before the current soil tillage was found on PR. The soil tillage also drastically reduced the spatial dependence of PR, making it impossible to use geostatistical mapping techniques.

Keywords: Eucalyptus, harvesting, soil tillage, harvest residue, physical properties, geostatistics.

INTRODUÇÃO

As florestas plantadas no Brasil ocupam 9,93 milhões de hectares, o que corresponde a apenas 1,2 % de todo o território nacional, sendo, contudo, responsáveis por 91 % de toda a madeira destinada à indústria no país. Estima-se que 6% do PIB brasileiro advinha do setor florestal (IBGE, 2016). O setor florestal brasileiro tem se destacado mundialmente pela produtividade média de $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nas áreas cultivados com eucalipto, chegando em várias situações a $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Essas elevadas produtividades tem reduzido o ciclo de colheita (inferior a sete anos) dos plantios. Tal cenário tem levado a intensificação do uso da mecanização, pois pode otimizar os sistemas de produção e, simultaneamente, criar condições favoráveis ao desenvolvimento das espécies florestais cultivadas para fins comerciais (ABRAF, 2013; MENDES; BELING; TREICHEL, 2016).

Os sistemas de manejo mecanizado oferecem opções práticas que podem reduzir os impactos negativos ocasionados sobre o solo, como, por exemplo, manejar os resíduos vegetais dentro e/ou fora do talhão. Fatores de ordem econômica e operacional (ou logística) podem interferir nas tomadas de decisão quanto à sua adoção, não raramente sobrepondo-se às questões relacionadas aos impactos causados ao solo, colocando em risco a sustentabilidade da atividade florestal a médio e longo-prazos. Assim, torna-se imprescindível uma avaliação das perturbações edáficas causadas pelo manejo mecanizado, sobretudo do potencial de compactação do solo para assegurar a sustentabilidade dessa atividade.

Adequar a utilização de maquinário pesado às diferentes condições edafoclimáticas, não raramente desfavoráveis ao tráfego, tem sido um desafio constante para a produção florestal (RAPER, 2005). As práticas utilizadas nas operações de colheita e transporte não levam em consideração o risco de compactação do solo. Ainda, as operações de preparo de solo normalmente não consideram a distribuição espacial e a profundidade da compactação, causando perturbações ao solo e onerando os custos de produção. O preparo de solo é feito visando mitigar a compactação, criando condições físicas para o desenvolvimento das raízes. A qualidade desta operação garante o êxito das operações subsequentes (plantio, adubações e os tratos culturais). Em áreas onde há forte presença de resíduos culturais é necessária a remoção destes com máquinas de grande porte,

visando facilitar o deslocamento dos implementos e, conseqüentemente, aumentar o rendimento operacional (BORTOLAS; STAHL; MINATEL, 2013). Embora a deposição de resíduos sobre o solo seja fundamental para atenuar os impactos do tráfego de máquinas (LOPES et al., 2015; MCDONALD; SEIXAS, 1997; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SEIXAS; OLIVEIRA; SOUZA, 1998), os efeitos cumulativos da colheita e do posterior preparo do solo sobre a qualidade física de solos florestais, à curto, médio e longo prazos, ainda não são totalmente conhecidos.

A deterioração da qualidade física de solos florestais também pode ser intensificada pela derrubada de grandes árvores, por forças aplicadas durante o crescimento radicular, pelo arraste e levantamento dos troncos e pelo elevado peso do maquinário utilizado (ARVIDSSON et al., 2001). Esses fatores normalmente conferem um padrão heterogêneo de perturbação física a essas áreas, o que pode, também, ser verificada em camadas mais profundas do solo (GREACEN; SANDS, 1980; HORN; VOSSBRINK; BECKER, 2004; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Tais condições promovem alterações nas propriedades físicas do solo, tais como: o aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração de raízes (RP); a redução do volume de macroporos, da infiltração e movimento de água no solo e, fluxo interno de ar no solo, todas relacionadas à redução de produtividade das espécies florestais (CAMBI et al., 2017; DÉFOSSEZ et al., 2014; GAERTIG et al., 2002; GYSI, 2001; HATTORI et al., 2013; LIPIEC; HATANO, 2003; MCQUEEN; SHEPHERD, 2002; NAJAFI; SOLGI; SADEGHI, 2009; PINARD; BARKER; TAY, 2000).

As propriedades físicas citadas anteriormente podem sinalizar a necessidade de preparo de solo e, também, são utilizadas no diagnóstico das condições físicas pós-preparo, bem como podem ser utilizadas para a adoção de medidas preventivas. A medida da RP se destaca, dentre os demais indicadores físicos, pela relativa facilidade de obtenção em campo, além de apresentar correlação com variáveis dendrométricas (p.e. volume de madeira) e, também, com outros indicadores de compactação do solo (p.e. densidade do solo) (CAMBI et al., 2017; DEDECEK; GAVA, 2005; GEIST; HAZARD; SEIDEL, 1989; LIMA et al., 2010). No ensaio de RP é quantificada a força ou pressão necessária para a penetração de uma haste metálica de ponta cônica no solo, visando relacioná-la com a força contrária exercida pela matriz do solo durante o crescimento das raízes. O ensaio é feito com o auxílio

de penetrômetros automáticos (ensaio estático, onde a haste é penetrada no solo em velocidade constante) ou de impacto (ensaio dinâmico, onde a penetração é feita por meio da queda de um peso sobre a haste).

As medições da RP são fortemente influenciadas pela umidade do solo no momento da amostragem, pela densidade e textura do solo (AMIRINEJAD et al., 2011; VAZ et al., 2011). Para uma determinada umidade do solo, a RP aumenta com o aumento da densidade, e, também, para uma mesma densidade, a RP diminui com o aumento da umidade do solo. Solos de textura fina e baixos teores de umidade apresentam alta RP em relação a solos de textura grossa com os mesmos teores de umidade. Recomenda-se que, para minimizar a influência desses fatores, as medidas de RP sejam feitas próximas à capacidade de campo do solo e/ou acompanhadas por determinações da umidade atual e/ou densidade do solo. Essas variáveis devem servir como indicadores representativos das condições edáficas nas quais os valores de RP foram obtidos, possibilitando as comparações entre sistemas de manejo.

A determinação de um valor crítico de RP acima do qual o crescimento radicular é fortemente limitado pode servir como indicativo da necessidade de preparo de solo e facilitar a comparação entre sistemas de manejo distintos. A maioria dos autores têm relatado valores críticos acima de 3 MPa como restritivos ao crescimento das raízes de espécies florestais. Em solos com RP acima de 3 MPa ocorreu severa restrição ao crescimento das raízes de mudas de *Pinus radiata* (SANDS; GREACEN; GERARD, 1979) enquanto 4,5 MPa foi considerado crítico para mudas de eucalipto (MISRA; GIBBONS, 1996) e, para outras espécies florestais, o valor limitante variou de 2 à 3 MPa no quinto ano pós-plantio (SINNETT et al., 2008). Tais variações ocorreram por ocasião das diferenças entre espécies avaliadas, como também pelas várias condições edáficas nas quais os estudos são desenvolvidos (BENGOUGH; MULLINS, 1990; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). A taxa de crescimento radicular diminui exponencialmente com o aumento da RP, portanto, é importante considerar que, valores de RP abaixo do considerado crítico, podem afetar o desenvolvimento das raízes, mesmo que em uma escala diferente e com menor intensidade (ZOU et al., 2001).

Apesar da relativa facilidade na determinação da RP, a metodologia para a sua aquisição à campo ainda têm sido um gargalo no planejamento de avaliação da compactação do solo. Nas últimas décadas, com o avanço da silvicultura de precisão, têm-se intensificado o uso da geoestatística para a avaliação da RP e demais

indicadores físicos do solo (BARIK et al., 2014; COELHO; CORTEZ; OLSZEWSKI, 2012; FILHO et al., 2011; SOUZA et al., 2001). A identificação geoespacial dos locais críticos de compactação permite realizar o manejo específico das áreas avaliadas, o que é interessante do ponto de vista estratégico do manejo, visto que as práticas de mitigação da compactação do solo são onerosas e de alto custo energético. Há, porém, situações em que a obtenção de estimativas confiáveis envolve grande esforço amostral e custo operacional, o que do ponto de vista prático pode tornar inviável a adoção de uma determinada metodologia (EBELING; LANG; GAERTIG, 2016).

Em última análise, o desenvolvimento de trabalhos que abordem o comportamento geoespacial de variáveis físicas em diferentes sistemas de manejo, em particular àqueles relacionados às florestas comerciais, pode contribuir sobremodo para o conhecimento e utilização da geoestatística. Essas informações devem ser parte fundamental de um plano de manejo consistente da compactação do solo, o qual deve envolver a prevenção da compactação, juntamente com a otimização dos processos de avaliação e correção dos efeitos das operações mecanizadas sobre as propriedades físicas do solo (ARVIDSSON et al., 2001; GONÇALVES et al., 2017; ZENNER; BERGER, 2008).

Nesse contexto, considerando que o manejo florestal contínuo de uma mesma área, com práticas mecanizadas de preparo de solo, colheita e demais tratamentos culturais envolvidos, repetidos em ciclos de tempos cada vez menores podem levar a alterações cumulativas das propriedades físicas do solo, objetivou-se avaliar os impactos do conjunto práticas mecanizadas (colheita, manejo de resíduos e preparo do solo) e sua atenuação por resíduos em superfície sobre comportamento da RP em um Latossolo Vermelho argilo-arenoso sob cultivo de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

Características da área e descrição dos tratamentos

A área experimental sob plantio florestal está localizada na Fazenda Monte Alegre (bloco BRM-J9A), pertencente a Empresa Klabin S/A, município de Telêmaco Borba-PR (24°18'15'' S e 50°36'39'' W e a 770 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa e Cfb, ou seja, clima subtropical com temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C (mesotérmico)

e no mês mais quente acima de 22 °C, verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, porém sem uma estação seca definida. A umidade relativa e a precipitação média anual situam-se entre 70 a 75 % e entre 1.400 a 1.600 mm, respectivamente (IAPAR, 2000). A classe de solo dominante na área é Latossolo Vermelho distrófico e o relevo é suavemente ondulado (Tabela 1). O solo apresenta classe textural variando de média argilosa à média arenosa (EMBRAPA, 2013) (Tabela 1).

O bloco BRM-J9A apresenta histórico de uso com plantios comerciais de florestas há aproximadamente três décadas, tendo sido conduzido inicialmente um ciclo de eucalipto de aproximadamente 20 anos, alterado, posteriormente, para ciclos de oito anos a partir de setembro de 2008. O último povoamento florestal foi colhido em novembro de 2016, sendo composto de híbridos oriundos do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, clone 12/52. O espaçamento utilizado foi de 2,50 m entre plantas e 3,50 m entre linhas de plantio, totalizando 1.142 árvores ha⁻¹. Esse povoamento apresentou os seguintes indicadores: altura média do dossel de 19,50 m, diâmetro médio a altura do peito de 0,16 m e o incremento médio anual com casca aos sete anos de 65 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.

Nessa área foi instalado experimento de longa duração composto por tratamentos que retratam os sistemas de colheita adotados na empresa, definidos pelo tipo de equipamento utilizado normalmente nas operações de colheita, sendo: harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS). Nas áreas colhidas por cada um dos sistemas adotados (HF e FS) também foram implantados tratamentos diferenciados quanto à quantidade e natureza dos resíduos vegetais produzidos durante essas operações, no caso a manutenção de 100%, 50% e 0% dos resíduos culturais sobre a superfície (Figura 1a). Assim, no sistema de colheita HF, 100% representa os resíduos produzidos durante a colheita (cascas, galhos, folhas, ponteiros, etc.), os quais foram mantidos juntamente com a serapilheira remanescente da floresta que se encontrava sobre o solo; 50% envolveu a remoção dos resíduos produzidos na colheita e permanência da serapilheira remanescente da floresta; e 0% refere-se a remoção total do resíduo produzido na colheita, juntamente com a serapilheira remanescente da floresta. Em contrapartida, para o sistema FS, 100% refere-se aos resíduos produzidos fora do talhão (ponteiros), os quais são retornados à área e espalhados sobre a serapilheira remanescente da floresta; 50% correspondeu a

permanência da serapilheira remanescente da floresta; e 0% à remoção total da serapilheira remanescente da floresta (Figura 1a).

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas de condução do plantio colhido (C) e de renovação do plantio (R) com resíduos sobre a superfície (100%, 50% e 0%), oriundos de sistemas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS)

Camada (m)	Atributos químicos ¹								Granulometria ²			
	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	MO	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa
		mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			dag kg ⁻¹			kg kg ⁻¹	
HF_R (100%, 50% e 0%)												
0-0,20	5,0	2,1	47,0	2,49	0,54	0,59	8,90	3,76	0,28	0,10	0,36	0,26
0,20-0,40	4,8	1,8	23,0	2,44	0,45	0,49	7,30	3,49	0,30	0,09	0,34	0,26
0,40-0,60	4,5	1,4	15,0	0,52	0,16	1,18	6,50	2,02	0,31	0,11	0,32	0,26
HF_C												
0-0,20	4,4	2,2	23,0	0,31	0,39	2,06	10,20	3,63	0,32	0,11	0,30	0,26
0,20-0,40	4,2	1,3	8,0	0,00	0,12	1,67	6,30	1,75	0,32	0,11	0,29	0,25
0,40-0,60	4,2	1,1	4,0	0,02	0,12	1,47	6,00	1,48	0,30	0,12	0,31	0,27
FS_R (100%, 50% e 0%)												
0-0,20	4,3	1,6	15,0	0,23	0,13	1,76	9,10	3,09	0,35	0,06	0,27	0,32
0,20-0,40	4,2	1,4	12,0	0,18	0,09	1,76	8,60	2,42	0,37	0,07	0,27	0,29
0,40-0,60	4,1	1,0	6,0	0,02	0,06	1,57	7,90	2,28	0,39	0,07	0,26	0,28
FS_C												
0-0,20	4,2	2,0	27,0	0,19	0,14	2,65	9,50	4,03	0,33	0,09	0,29	0,27
0,20-0,40	4,2	1,3	8,0	0,03	0,07	2,06	7,90	2,55	0,27	0,14	0,31	0,27
0,40-0,60	4,1	1,3	6,0	0,01	0,07	1,96	8,90	2,28	0,23	0,19	0,33	0,28

⁽¹⁾Atributos químicos: pH H₂O determinado por potenciometria (relação solo:solução 1:2,5); K⁺ e P disponível extraídos com Mehlich-1 e determinados com fotometria de chama e espectrometria, respectivamente; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por fotometria e titulometria (DEFELIPO; RIBEIRO, 1981); H+Al acidez total extração com Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinado por titulometria; MO: matéria orgânica do solo determinada pelo método Walkey-Black (YEOMANS; BREMNER, 1988). ⁽²⁾Granulometria: Determinação pelo método da pipeta após dispersão química com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e física por agitação vertical por 16hs (50 rpm) de TFSA. Areia grossa e areia fina foram separadas em peneira de 0,053 e 0,210 mm, respectivamente, com posterior separação de silte e argila por sedimentação (EMBRAPA, 2017).

Na área experimental de renovação do plantio (R), após a colheita e manejo dos resíduos (remoção ou adição) sobre a superfície, foi realizado o preparo do solo, composto por uma subsolagem a 0,50 m de profundidade, utilizando um trator de esteira equipado com subsolador. O plantio foi realizado, em seguida, manualmente, no dia 16/03/2017, utilizando mudas de eucalipto clone I144, no espaçamento de 1,82 m entre plantas e 3,30 m entre linhas de plantio, totalizando 1.666 árvores ha⁻¹. Outras duas áreas adjacentes foram conduzidas sob rebrota e também colhidas pelos dois sistemas de colheita (HF e FS), porém nestas não foi feito o preparo do solo e a quantidade de resíduos sobre a superfície permaneceu da forma que originalmente cada sistema de colheita foi operacionalizado em campo, ou seja, no sistema HF

houve acúmulo de resíduos da colheita sobre a superfície do solo e, no sistema FS, não houve acúmulo de resíduos da colheita sobre a superfície.

Assim, os tratamentos estabelecidos na área experimental consistiram dos dois sistemas de colheita (HF ou FS), seguido da renovação do plantio (R), nesse caso com preparo de solo precedido do manejo de resíduos culturais (100%, 50% e 0%), e a condução do plantio colhido (C) (Figura 1a).

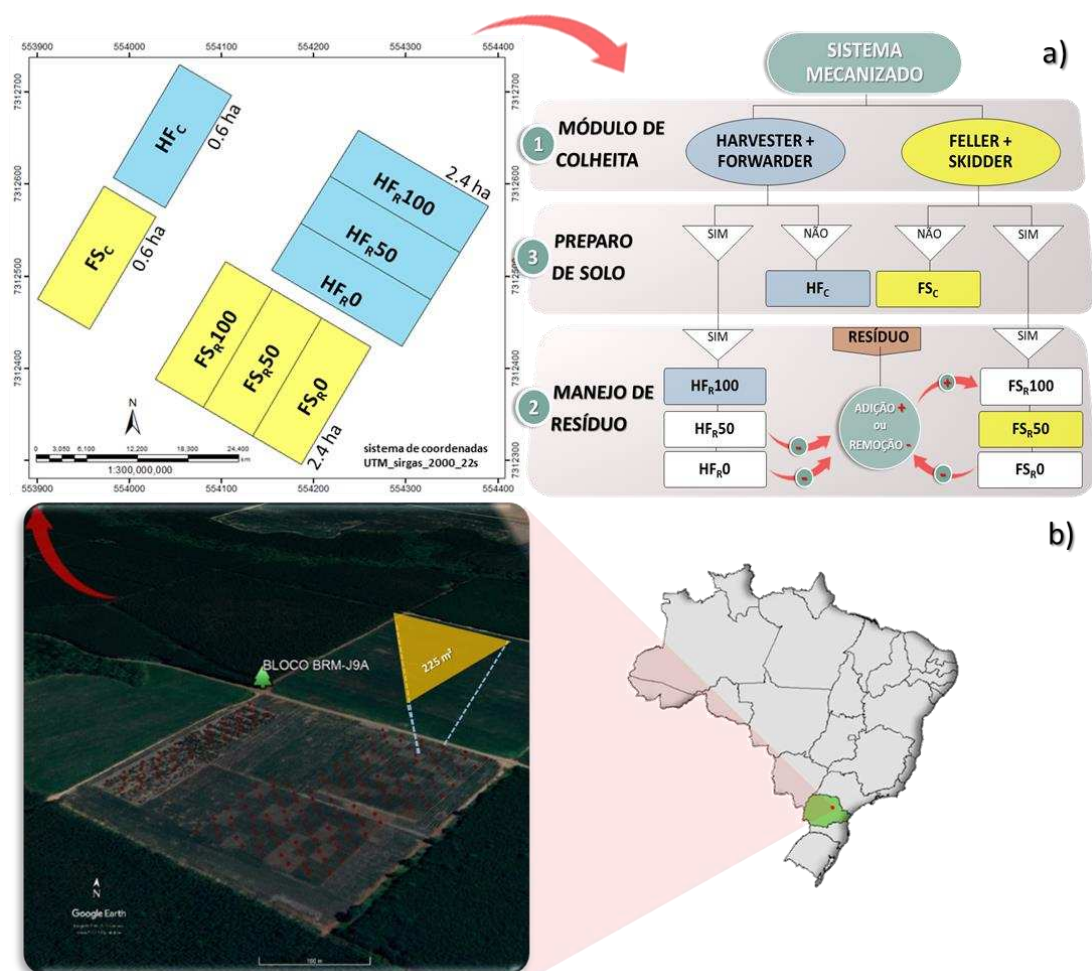


Figura 1. (a) Disposição dos tratamentos e fluxograma dos sistemas de colheita, respectivos tratamentos e sequência de execução das operações. Polígonos de mesma cor (coloridos) representam tratamentos que possuem os mesmos níveis e tipos de resíduos gerados originalmente na forma como a colheita é operacionalizada em campo; (b) localização da área e pontos de amostragem, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS).

Amostragem de solo, medições de campo e análises de laboratório

A amostragem foi realizada período de 15 a 30 de julho de 2017, cerca de 240 dias após a colheita e 120 dias após o preparo de solo. Em campo, foram feitas medições de resistência do solo à penetração (RP), adotando-se, na amostragem das áreas, esquema sistematizado de coleta de pontos com leituras em quadruplicatas, coletados nos vértices de triângulos isósceles (com 15 m de altura e 30 m de base), demarcados na área experimental por meio de fitas de sinalização. Cada triângulo apresentou 225 m² e a amostragem abrangeu linhas e entrelinhas do plantio de forma intercalada, proporcionando maior representatividade da área amostral, totalizando 22 pontos em cada tratamento. Nas áreas sob renovação de plantio, o grid de 66 pontos formado pela união dos três sistemas de manejo de resíduo (22 pontos para 100%, 22 pontos para 50% e 22 pontos para 0%), nos dois sistemas de colheita (HF e FS) (Figura 1b), foi utilizado na avaliação do comportamento geoespacial da RP.

As medições de RP foram feitas até a profundidade de 0,60 m, utilizando um penetrômetro eletrônico digital da marca Falker e modelo penetroLOG/PLG1020, com resolução de aquisição de dados de 10 mm e velocidade aproximadamente constante de 30 mm s⁻¹. Amostras deformadas também foram coletadas para a caracterização granulométrica e da umidade do solo, porém, em 50% dos pontos de amostragem da RP, selecionados de forma alternada entre pontos, em cada tratamento. Essa coleta foi feita no centro das profundidades: 0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, utilizando um trado holandês. Os pontos de amostragem foram georreferenciados com um aparelho receptor GNSS da marca Leica e modelo GS14, configurado no sistema de coordenadas métricos (UTM), Fuso 22s e Datum Sirgas2000.

Em laboratório, a umidade gravimétrica do solo (U_{am}) foi determinada por meio da secagem de amostras deformadas em estufa à 105 °C por 48h, sendo calculada conforme a equação: $U_{am} (kg\ kg^{-1}) = (M_{su} - M_{ss})/M_{ss}$. Os dados de umidade na capacidade de campo (U_{cc}) utilizados como referência para comparação com a U_{am} , foram obtidos do segundo capítulo desta dissertação, considerando as mesmas áreas, tratamentos e profundidades avaliadas no presente estudo.

Análise estatística

Inicialmente, as variáveis foram analisadas por meio de estatística descritiva, determinando-se: média, mediana, máximo, mínimo, desvio padrão, coeficiente de

variação, assimetria e curtose. O coeficiente de variação (CV%) foi classificado como: baixo ($CV < 15\%$), médio ($15 \leq CV \leq 50\%$) e alto ($CV > 50\%$) (WARRICK, 1998). Também foi testada a normalidade da distribuição por meio do teste de Shapiro-Wilk, considerando como distribuição normal os dados que obtiveram resultado de p-valor $>0,05$, ou seja, valor não significativo ao nível de 95% de probabilidade (SHAPIRO; WILK, 1965). A assimetria da distribuição foi classificada de acordo com o coeficiente de assimetria (As), sendo: assimétrica ($|As| < 0,15$), moderada ($0,15 < |As| < 1,0$), e forte ($|As| > 1,0$). Quanto à forma da curva de distribuição (achatamento), foi classificada de acordo com o coeficiente de curtose (Ks), sendo: mesocúrtica ($Ks = 0$), planticúrtica ($Ks < 0$) e leptocúrtica ($Ks > 0$) (COELHO; CORTEZ; OLSZEWSKI, 2012).

Os intervalos de confiança (IC) das médias de RP foram determinados levando-se em consideração o número de amostras (n) e o desvio padrão da amostra (S), com nível de confiança 90% (PAYTON; MILLER; RAUN, 2000). A correlação entre RP e U_{am} foi verificada por meio do teste t de Student ao nível de 95% de confiança. Os dados utilizados nessa correlação foram referentes às médias dessas variáveis obtidas a cada 0,20 m de profundidade no perfil.

Na análise geoestatística foram realizados os cálculos das semivariâncias (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989), de acordo com a equação: $\gamma(h) = 1/2N(h) \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \right\}$; onde $\gamma(h)$ é a semivariância para classe de intervalo h; $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações e $Z(x_i)$; e $Z(x_i + h)$ é o valor de atributos medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h (distância entre amostras). Os cálculos das semivariâncias foram expressos em gráficos do tipo semivariogramas omnidirecionais para todas as camadas. Após a seleção do modelo de melhor ajuste para o semivariograma, com base no coeficiente de determinação (R^2) e na soma do quadrado dos resíduos (SQR), foram obtidos os parâmetros: alcance (Ao), efeito pepita (Co) e patamar (C). Os parâmetros obtidos foram utilizados para a avaliação do grau de dependência espacial da variável, por meio do cálculo do avaliador da dependência espacial (ADE), conforme a expressão: $ADE = [Co / (C + Co)] * 100$, sendo classificada como: forte ($ADE \leq 25\%$), moderada ($25\% < ADE \leq 75\%$) e fraca ($ADE > 75\%$) (CAMBARDELLA et al., 1994).

Também, por meio da estatística clássica, foi determinado o número ideal de amostras em função do erro relativo em torno da média (Petersen and Calvin, 1965),

para todas as profundidades, conforme a equação: $n = t_{\alpha}^2 * S^2 / D^2$; onde n é o número de amostras; t é o valor da tabela de distribuição “t” em função do nível de significância (α) e do número de graus de liberdade com que se estimou a variância amostral; S é o desvio padrão da amostra; e D é o produto da média pela percentagem de variação em torno da média. O nível de significância adotado foi de até 0,05.

A verificação de normalidade, assim como as análises de estatística descritiva, cálculos dos intervalos de confiança e as correlações entre as variáveis físicas foram efetuadas por meio do software R 3.4.3 (R Core Team, 2017). A análise geoestatística foi realizada por meio do software GS+ (ROBERTSON, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Manejo florestal mecanizado e resistência do solo à penetração

Os teores de U_{am} apresentaram valores mínimos de 0,13 e 0,16 kg kg⁻¹ e máximos de 0,22 e 0,32 kg kg⁻¹, com médias de 0,22 e 0,24 kg kg⁻¹, respectivamente nas áreas de HF (HF_R e HF_C) e FS (FS_R e FS_C). Observou-se a tendência de agrupamento dos valores de U_{am} entorno da média nas duas situações (HF e FS), havendo pontos mais dispersos e que refletem a variabilidade natural de atributos do solo, comum em trabalhos conduzidos em campo. A pequena variação entre as médias de U_{am} (0,02 kg kg⁻¹), resultou em coeficientes de variação (CV%) médios e baixos (16,29 e 13,58%), respectivamente para HF e FS. Isto, denota, portanto, condições de umidade muito próximas entre tratamentos (Figura 2). Possivelmente a pequena variação dos valores de U_{am} entre os tratamentos deve-se ao período de chuvas que antecedeu a amostragem das áreas, contribuindo, assim, para homogeneização das condições de umidade do solo na área total do experimento.

As médias da umidade na capacidade de campo (U_{cc}) das áreas avaliadas foi de 0,20 e 0,21 kg kg⁻¹, respectivamente, para HF (HF_R e HF_C) e FS (FS_R e FS_C) (Figura 2). A dispersão dos valores de U_{cc} seguiu tendência de centralização e poucos pontos são observados próximos aos limites superiores e inferiores (Figura 2). As diferenças entre as médias gerais de U_{cc} e U_{am} foram de 0,02 e 0,03 kg kg⁻¹, respectivamente para HF e FS, ou seja, muito próximas, o que indica que a determinação de RP foi próxima da capacidade de campo do solo. Nas áreas há pouca variação horizontal e vertical da granulometria do solo, em particular da

argila, o que, dentre outros fatores, favorece condições homogêneas de U_{cc} (Tabela 1). Isso implica que a condição de umidade na capacidade de campo, como foi o caso, resultou em pouca variação na U_{am} nesses solos (Figura 2). O estado de umidade do solo “padrão” é importante e deve ser considerado durante a amostragem de RP, principalmente quando deseja-se relacionar a RP com o estado de compactação do solo submetido a diferentes sistemas de manejo em aspecto comparativo (BUSSCHER et al., 1997; VAZ et al., 2011).

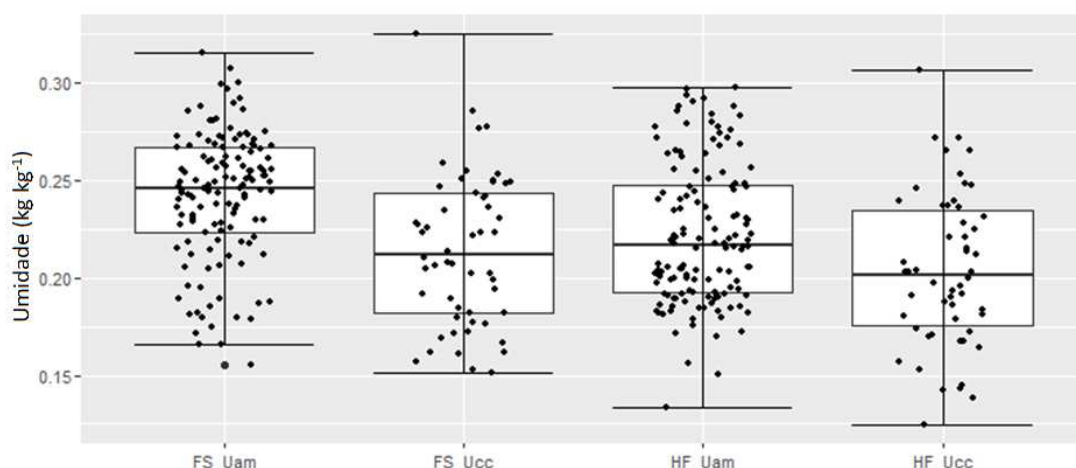


Figura 2. Umidade atual (U_{am}) e na capacidade de campo (U_{cc}) de Latossolo Vermelho argilo-arenoso, em três camadas: 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS).

As correlações entre as variáveis RP e U_{am} não foram significativas ($p > 0,05$) tanto para HF (HF_R e HF_C) (Figura 3a) quanto FS (FS_R e FS_C) (Figura 3b). A RP pode correlacionar-se significativamente e inversamente com a umidade do solo (AMIRINEJAD et al., 2011; BUSSCHER et al., 1997), especialmente quando maior é a variação da umidade no solo (VAZ et al., 2011). A provável ausência de significância estatística no presente estudo está associada à pequena variação da U_{am} entre tratamentos e em profundidade, o que indica condições homogêneas da umidade do solo nas diferentes condições experimentais.

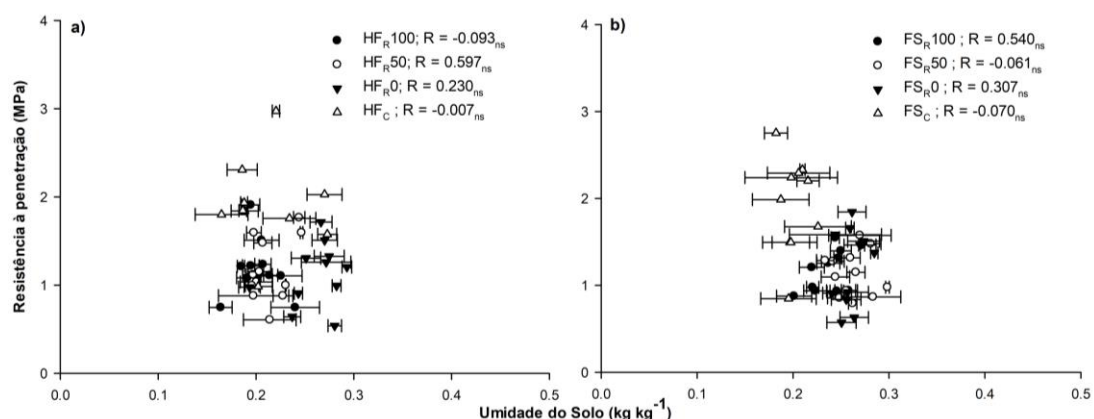


Figura 3. Dispersão de pontos e coeficientes de correlação entre resistência à penetração (RP) e umidade atual (U_{am}) de Latossolo Vermelho argilo-arenoso em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS).

Em todas as profundidades foram constatados valores semelhantes para as médias e medianas de RP, indicando uma tendência de centralização dos dados entorno dos valores médios, tanto nas áreas HF (HF_R e HF_C) quanto FS (FS_R e FS_C) (Tabela 2). O teste de normalidade (Shapiro-Wilk) apontou que 90% dos dados apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$). Esse comportamento dos dados indica que, na maioria das situações, os valores médios de RP apresentam boa representatividade do conjunto de dados.

Nas áreas de renovação do plantio e manejo de resíduos, as médias gerais de RP variaram de 0,81 a 1,35 MPa e 0,97 a 1,31 MPa para HF_R e FS_R , respectivamente (Tabela 2). Nessas áreas, a RP na camada 0-0,20 m apresentou alta variabilidade ($CV > 50\%$), diminuindo gradativamente com a profundidade, sendo cerca de 50% menores na camada 0,40-0,60 m em relação às camadas anteriores. Esse comportamento não é muito distante do que é normalmente observado em sistemas de manejo florestal mecanizado (BARIK et al., 2014; SOUZA et al., 2001). As camadas superficiais estão mais sujeitas aos efeitos do preparo de solo juntamente com maior susceptibilidade aos efeitos do tráfego de máquinas e arraste dos troncos quando comparadas às camadas mais profundas do solo (SOUZA et al., 2001).

Não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de RP das camadas avaliadas nas áreas sob renovação do plantio, tanto no sistema HF_R quanto FS_R (Tabela 2). Esses resultados apontam que a manutenção total ou remoção parcial

ou total dos resíduos culturais antes do preparo de solo não afetaram significativamente os valores de RP no curto prazo, independentemente do sistema de colheita adotado. Contudo, deve-se considerar que nas áreas onde há remoção total do resíduo, as renovações subsequentes levarão ao tráfego de máquinas sobre uma quantidade cada vez menor de resíduos sobre a superfície, principalmente quando a árvore é processada fora do talhão (módulo feller + skidder). A opção de retornar com os resíduos após a colheita (retratado pelo tratamento FS_R100) pode ser inviável economicamente por implicar em mais uma operação com custos associados, além da opção de uso dos resíduos culturais como fonte de energia na indústria ser uma opção e que pode ser economicamente bastante interessante.

Muitos trabalhos na literatura relatam os efeitos positivos da presença de resíduos florestais sobre a superfície do solo (LOPES et al., 2015; MCDONALD; SEIXAS, 1997; SEIXAS; OLIVEIRA; SOUZA, 1998), podendo chegar até 56% de redução da compactação do solo com a sua presença (SEIXAS; OLIVEIRA; SOUZA, 1998). Os resíduos orgânicos formam uma camada protetora que diminui o contato e a pressão da máquina sobre a superfície do solo, ajudando a dissipar a pressão aplicada pelo peso do maquinário, diminuindo os riscos de compactação (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Diante disso, durante as renovações subsequentes deve-se dar maior atenção ao monitoramento da compactação em áreas onde houve remoção dos resíduos antes do preparo de solo.

Os resultados de resistência a penetração (RP) no perfil do solo (0-0,60 m) em HF_R e FS_R são bastante semelhantes (Figura 4a e 4c). Essa relativa uniformidade da RP no perfil dos tratamentos é efeito do preparo de solo, pois o mesmo foi realizado posteriormente às operações de colheita e manejo de resíduos. Esse efeito também pode ser evidenciado ao se comparar o comportamento das médias de RP em profundidade de HF_R100 e FS_R50 com àquelas de HF_C e FS_C , respectivamente, pois, para o mesmo sistema de colheita, esses tratamentos possuem a mesma quantidade de resíduos, diferindo apenas em relação ao preparo de solo (Figuras 4b e 4d).

As médias de RP em todas as profundidades de HF_R100 e FS_R50 foram significativamente menores do que àquelas obtidas respectivamente em HF_C e FS_C , respectivamente (Figura 4b e 4d). Conforme comentado, em HF_R100 e FS_R50 não houve operação adicional para o manejo dos resíduos, sendo a mesma forma de colheita operacionalizada respectivamente em HF_C e FS_C , ou seja, esses tratamentos

diferem apenas em relação à presença ou ausência do preparo de solo. Assim, quando comparados, pode-se ressaltar que o preparo de solo levou a redução da RP em 0,98 e 0,60 MPa, respectivamente em HF e FS, até 0,60 m de profundidade. Valores semelhantes (0,50 MPa) após preparo de solo à 0,50 m de profundidade em área colhida com sistema feller + skidder são relatados na literatura (GONÇALVES et al., 2016). Pode-se considerar que, na presente situação, o preparo de solo reverteu possíveis impactos negativos dos sistemas de colheita sobre a RP.

O preparo de solo visa eliminar possíveis camadas impeditivas ao movimento de água e ar até a profundidade de trabalho desejada. Em solos florestais o preparo de solo é geralmente feito até a profundidade de 0,50 m (GONÇALVES et al., 2016), podendo atingir até 1,0 m de profundidade, considerando situações em que camadas impeditivas ao crescimento das raízes é observada (FABIOLA et al., 2003). O efeito do preparo de solo sobre as propriedades físicas do solo podem persistir ao longo de décadas em solos florestais (CAMBI et al., 2017; ROCHA et al., 2015). Deve-se considerar que o esquema sistemático de amostragem abrangeu as linhas e entrelinhas do plantio atual e do passado, havendo preparo de solo nas linhas para o plantio atual e o mesmo nas entrelinhas atuais quando eram linhas do plantio anterior (oito anos atrás). É provável que a igualdade estatística observada entre os valores de RP dos tratamentos que compõem os sistemas de colheita não esteja unicamente relacionada ao preparo de solo atual, sendo, dessa forma, também dependente do histórico de preparo das subsolagens anteriores.

Independentemente da profundidade avaliada, os valores de RP estão abaixo do valor crítico para o desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto, no caso 3 MPa (MISRA; GIBBONS, 1996; SANDS; GREACEN; GERARD, 1979; SINNETT et al., 2008) e em acordo com os obtidos por Gonçalves et al. (2016). Esses autores estudaram profundidades de trabalhos em operações de preparo de solo em Latossolo Vermelho e obtiveram resultados semelhantes ao do presente trabalho. O preparo do solo nas áreas de renovação de plantio minimizou os impactos negativos do tráfego de máquinas sobre a RP e, possivelmente, também reduziu as potenciais diferenças ocasionadas pelos diferentes sistemas de colheita e manejo de resíduos.

Nas áreas de condução do plantio, a RP apresentou médias gerais de $2,08 \pm 0,25$ e $1,91 \pm 0,20$ MPa, variando de 1,74 a 2,40 MPa e 1,51 a 2,27 MPa entre as camadas, respectivamente para HF_C e FS_C (Tabela 2). O CV da RP nessas áreas foi classificado como médio ($15 \geq CV \leq 50\%$) em todas as camadas avaliadas e em

ambos os sistemas de colheita, apresentando menores variações em relação às áreas de renovação do plantio (HF_R e FS_R). A ausência de preparo de solo nas áreas de condução contribuiu para a menor variação observada.

Mesmo nas áreas sob condução do plantio, sem preparo de solo, os valores de RP estiveram abaixo do nível estabelecido como crítico (3MPa) para o desenvolvimento do eucalipto. A menor frequência de tráfego de máquinas de colheita nas áreas de condução do plantio, possivelmente contribuiu para que a RP não ultrapasse os limites críticos. Nesse sentido, vários autores constataram aumentos significativos na RP somente após várias passagens de máquinas sobre a área, a ponto de exceder o limite crítico de 3 MPa (AMPOORTER et al., 2007; JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014; SCHAEFER; SOHNS, 1993; WILLIAMSON; NEILSEN, 2000).

Outros fatores, também, podem ter contribuído para a menor compactação do solo, entre eles a topografia do terreno associada a classe dos Latossolos, os menores conteúdos de água no solo durante a colheita e o efeito do preparo anterior. Terrenos declivosos geralmente apresentam maior compactação do solo com o aumento do número de passadas, comparativamente às áreas de declives suaves (JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014). Em condições de solo relativamente homogêneas, como é o caso, o conteúdo de água controla a capacidade de carga do solo e o tráfego sobre solos mais secos reduz o risco de compactação (RICHART et al., 2005). A classe dos Latossolos que naturalmente possuem microestrutura granular fortemente desenvolvida são, relativamente, mais resistentes a compactação do solo (Tormena et al., 1998).

O comportamento da RP até a profundidade de 0,60 m foi semelhante entre HF_C e FS_C (Figuras 4b e 4d), indicando que, no curto prazo, os diferentes níveis de resíduos gerados pelos sistemas de colheita adotados, no caso HF (com resíduos) e FS (sem resíduos), também, não influenciaram significativamente os níveis de RP nas áreas de condução do plantio. A camada 0-0,20 m, com valores de $2,12 \pm 0,29$ e $2,27 \pm 0,32$ MPa em HF_C e FS_C , respectivamente, foi a que a RP esteve mais próxima do nível considerado crítico (3 MPa) (Tabela 2). Ressalta-se que as medições de RP apresentadas nesse estudo foram referentes ao solo com umidade próxima a capacidade de campo. Com a redução da umidade do solo, a RP pode atingir níveis críticos e caso essa condição se estenda (veranicos, por exemplo), o crescimento e desenvolvimento radicular das espécies florestais poderá ser prejudicado.

Tabela 2. Resistência do solo à penetração (RP) de Latossolo Vermelho argilo-arenoso, nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS)

Prof. (m)	Média ¹ (MPa)	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV(%)	W	p valor
harvester+forwarder								
HF_R100								
0-0,20	0,81 ± 0,18	0,84	0,52	0,12	2,10	64,22	0,93	0,14 _{ns}
0,20-0,40	1,19 ± 0,17	1,26	0,49	0,24	2,29	41,57	0,98	0,92 _{ns}
0,40-0,60	1,35 ± 0,13	1,37	0,37	0,77	2,28	27,60	0,96	0,48 _{ns}
HF_R50								
0-0,20	1,03 ± 0,20	1,00	0,56	0,26	1,97	54,35	0,94	0,16 _{ns}
0,20-0,40	1,30 ± 0,16	1,29	0,46	0,59	2,23	35,06	0,97	0,62 _{ns}
0,40-0,60	1,32 ± 0,10	1,24	0,30	0,91	1,91	22,43	0,90	0,04*
HF_R0								
0-0,20	1,14 ± 0,24	0,99	0,69	0,30	2,45	60,45	0,92	0,07 _{ns}
0,20-0,40	1,31 ± 0,15	1,41	0,42	0,63	1,94	32,42	0,92	0,07 _{ns}
0,40-0,60	1,33 ± 0,11	1,35	0,30	0,72	2,01	22,56	0,99	1,00 _{ns}
HF_C								
0-0,20	2,12 ± 0,29	2,08	0,75	0,78	3,54	35,23	0,98	0,91 _{ns}
0,20-0,40	2,40 ± 0,28	2,26	0,73	1,14	4,10	30,54	0,94	0,32 _{ns}
0,40-0,60	1,74 ± 0,20	1,59	0,51	1,02	3,18	29,21	0,88	0,03*
feller+skidder								
FS_R100								
0-0,20	0,97 ± 0,19	0,79	0,53	0,24	1,89	55,14	0,89	0,02*
0,20-0,40	1,23 ± 0,12	1,16	0,35	0,65	1,81	28,44	0,96	0,50 _{ns}
0,40-0,60	1,24 ± 0,11	1,21	0,30	0,60	1,82	24,13	0,97	0,80 _{ns}
FS_R50								
0-0,20	1,05 ± 0,19	0,88	0,55	0,29	2,22	52,15	0,92	0,09 _{ns}
0,20-0,40	1,21 ± 0,13	1,26	0,37	0,38	1,78	30,16	0,96	0,58 _{ns}
0,40-0,60	1,22 ± 0,07	1,22	0,20	0,80	1,69	16,43	0,99	0,99 _{ns}
FS_R0								
0-0,20	1,13 ± 0,23	1,20	0,66	0,29	2,23	58,14	0,89	0,02*
0,20-0,40	1,29 ± 0,14	1,37	0,40	0,44	2,05	30,59	0,98	0,91 _{ns}
0,40-0,60	1,31 ± 0,11	1,31	0,32	0,72	2,27	24,14	0,92	0,09 _{ns}
FS_C								
0-0,20	2,27 ± 0,32	2,29	0,83	0,40	3,65	36,34	0,98	0,92 _{ns}
0,20-0,40	1,95 ± 0,17	1,95	0,44	0,92	2,81	22,65	0,95	0,45 _{ns}
0,40-0,60	1,51 ± 0,11	1,45	0,27	1,19	2,01	18,20	0,88	0,03*

⁽¹⁾ Na linha, parâmetros da análise descritiva; Média ± intervalo de confiança (IC 90%); CV: coeficiente de variação %; W: teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de p < 0,05 e (ns) não significativo.

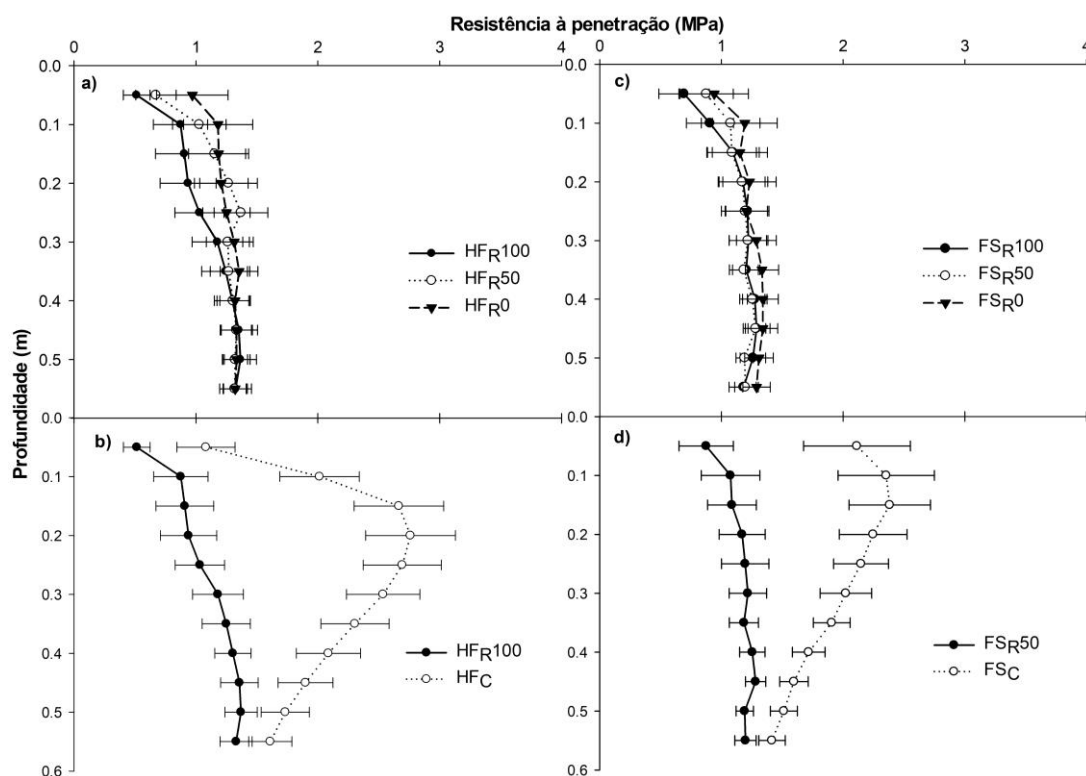


Figura 4. Resistência à penetração (RP) de Latossolo Vermelho argilo-arenoso, até a profundidade 0,60 m em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) e (b) harvester + forwarder (HF) e (c) e (d) feller + skidder (FS). Intervalo de confiança (90%) para médias a cada 0,05 m.

Avaliação do comportamento geoespacial da resistência do solo à penetração

Vieira (2000) recomenda que toda análise geoestatística deva ser precedida da análise descritiva para avaliação do comportamento geral dos dados. Neste tópico a estatística descritiva a ser apresentada não considera tratamentos individualmente ($n = 22$), mas o seu conjunto, englobando todos os tratamentos das áreas de renovação de plantio dentro de cada sistema de colheita HF ($H_{R100} + H_{R50} + H_{R0}$) e FS ($F_{SR0} + F_{SR50} + F_{SR0}$) ($n=66$).

Os dados apresentaram distribuição assimétrica moderada ($0,15 < |As| < 1,0$) à direita e curvas de distribuição planticúrticas ($Ks < 0$), o que reflete frequências próximas do valor médio (Tabela 3). O comportamento simétrico das distribuições aumentou de acordo com o aumento da profundidade do perfil, aproximando-se ao comportamento de uma curva normal padrão (Figura 5), o que foi comprovado por meio do teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Apenas a primeira camada (0,0-0,20 m), em ambos sistemas de colheita, não apresentou distribuição normal ($p < 0,05$) (Tabela 3). Esse comportamento da RP em superfície está de acordo com o observado em outros trabalhos de natureza semelhante (FILHO et al., 2011; LIMA et al., 2010). Apesar da distribuição normal ser preceito para a maioria dos testes de significância utilizados na estatística clássica, na geoestatística a ausência de normalidade não é um fator restritivo, pois maior importância deve ser dada a estacionaridade dos dados (VIEIRA, 2000).

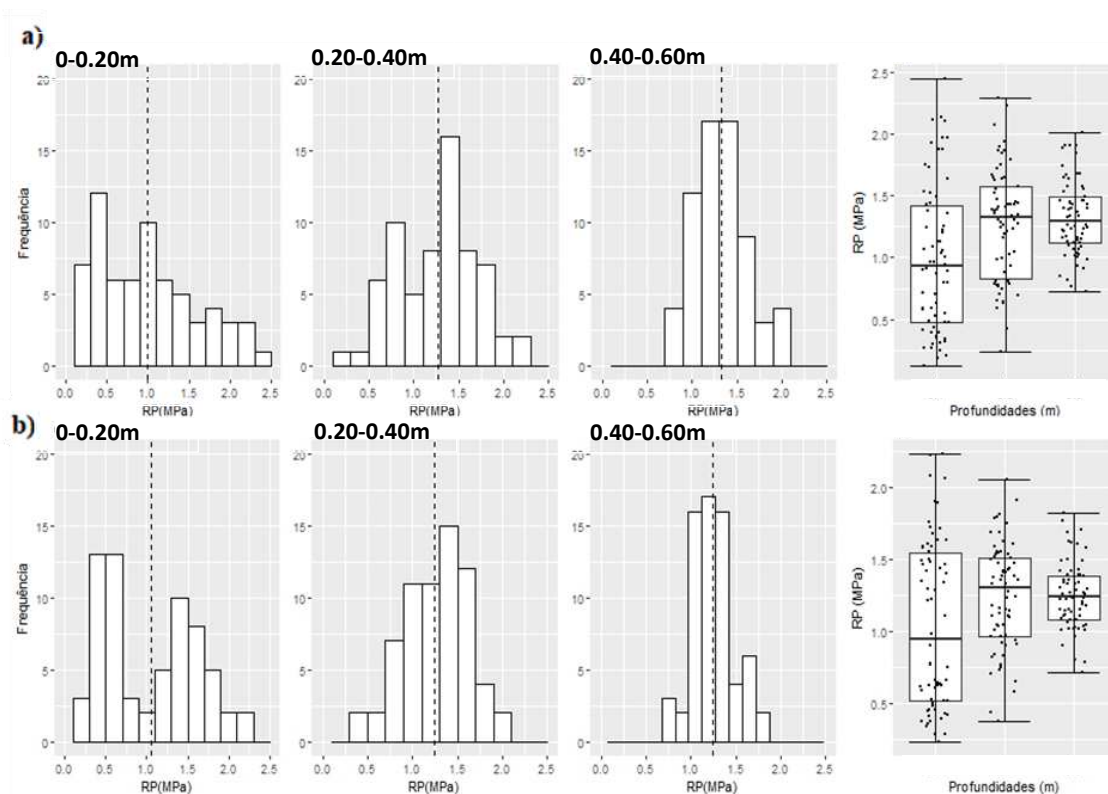


Figura 5. Histograma com linha de marcação para médias e box-plot com a dispersão dos dados em torno das médias para resistência à penetração (RP) de Latossolo Vermelho argilo-arenoso, nas camadas 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%), precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS).

De acordo com os parâmetros obtidos a partir da análise geoestatística da variável RP, as duas primeiras camadas (0-0,20 e 0,20-0,40 m) apresentaram efeito pepita puro ($C = C + C_0$) para os dois sistemas de colheita (HF e FS) (Tabela 3). Apenas na última camada (0,40- 0,60 m) de ambos, a RP apresentou dependência espacial, sendo classificada como de dependência fraca ($ADE = 90,50 \%$) e moderada ($ADE = 72,77 \%$), para HF e FS, respectivamente (Tabela 3).

A ausência de estrutura de continuidade espacial dos dados de RP nas duas primeiras camadas de solo avaliadas (0-0,20 e 0,20-0,40 m), tanto para HF (Figura 6a) quanto para FS (Figura 6b), impossibilitou o ajuste de modelos de semivariância. Apenas, os dados de RP da camada 0,40-0,60 m foram ajustados ao modelo linear. Esse modelo apresentou R^2 entre 0,14 e 0,69 para HF e FS, respectivamente (Tabela 3). Os baixos valores de R^2 , sobretudo para HF, mostram a baixa capacidade do modelo de semivariância em estimar a variabilidade da RP na área. O modelo linear, ajustado aos dados de RP, não apresentou o parâmetro alcance da dependência espacial, indicando que a distribuição espacial dessa variável na área tende a ser aleatória, inviabilizando o mapeamento da área amostral por krigagem no caso das camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m. A continuidade espacial é um pré-requisito para aplicação do método geoestatístico (VIEIRA, 2000). Por sua vez, para a camada 0,40-0,60 m, o mapeamento por krigagem seria possível por conta da continuidade espacial observada nessa camada. Porém, a baixa amplitude dos valores de RP e a constatação de valores médios abaixo do considerado crítico não justificam a utilização dessa variável para fins de mapeamento das áreas avaliadas.

Tabela 3. Parâmetros da análise descritiva e parâmetros da análise geoestatística para resistência à penetração (RP) de Latssolo Vermelho argilo-arenoso, nas camadas 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%), precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS)

Parâmetros ⁽¹⁾	harvester + forwarder			feller + skidder		
	Estatística descritiva					
Camada (m)	0-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60	0-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
Média (MPa)	0,99	1,27	1,32	1,05	1,24	1,25
Mediana	0,60	0,46	0,30	0,58	0,37	0,23
Desvio Padrão	0,93	1,32	1,30	0,94	1,30	1,24
Mínimo	0,12	0,24	0,72	0,24	0,38	0,72
Máximo	2,45	2,29	2,01	2,23	2,05	1,82
CV (%)	60,51	35,97	22,66	54,97	29,45	18,58
Assimetria	0,50	-0,01	0,30	0,29	-0,20	0,25

Curtose	-0,81	-0,65	-0,51	-1,30	-0,57	-0,12
Teste-W	0,94	0,98	0,98	0,91	0,99	0,98
p_valor	0,00*	0,40 _{ns}	0,37 _{ns}	0,00*	0,77 _{ns}	0,59 _{ns}

Geoestatística						
Modelo	Pepita puro	Pepita puro	Linear	Pepita puro	Pepita puro	Linear
Patamar	-	-	0,01	-	-	0,02
Pepita	0,34	0,20	0,09	0,35	0,14	0,04
Patamar+ Pepita	-	-	0,09	-	-	0,06
Alcance	-	-	-	-	-	-
R²	-	-	0,14	-	-	0,69
SQR	-	-	4,9x10 ⁻⁰⁴	-	-	1,0x10 ⁻⁰³
ADE (%)	-	-	90,50	-	-	72,77
Krigagem	não	não	sim	não	não	sim

(1) Parâmetros da análise descritiva e geoestatística; CV: coeficiente de variação; W: teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (ns) não significativo; ADE: avaliador de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação; SQR: soma do quadrado dos resíduos; Krigagem: metodologia de mapeamento.

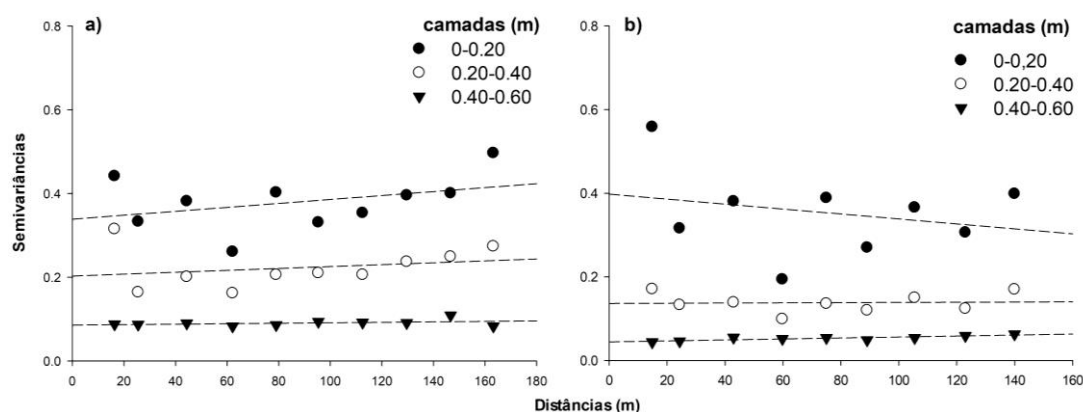


Figura 6. Semivariogramas da resistência à penetração (RP) de Latossolos Vermelho argilo-arenoso, nas camadas 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%), precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS).

A possível explicação para a baixa dependência espacial observada nesse estudo é a inexistência de continuidade espacial da RP antes e/ou depois da colheita, ou ainda, houve considerável redução após o preparo de solo, a tal ponto que as distâncias adotadas entre os pontos foram insuficientes para detectá-la. Na escala espacial adotada, portanto, a distribuição da variável constitui-se um fenômeno aleatório e o comportamento homogêneo da RP em áreas após preparo de solo não justifica o adensamento da malha amostral, pois haveria poucas contribuições práticas para o manejo na situação em questão, além de aumentar o custo e esforço amostral.

A hipótese que o preparo de solo reduziu a continuidade espacial da RP é reforçada pelo fato de que a dependência espacial fraca de propriedades do solo pode ser atribuída a fatores extrínsecos como os associados ao manejo do solo (p.e. preparo do solo e tráfego de máquinas agrícolas), enquanto aqueles de dependência forte podem ser atribuídos a fatores intrínsecos (p.e. material de origem, relevo, etc) (CAMBARDELLA et al., 1994). A ocorrência de dependência espacial apenas para a camada menos influenciada pelo manejo (0,40-0,60 m) reforça as observações feitas. Pode-se inferir, ainda, que a continuidade espacial observada em profundidade é um pequeno reflexo do que poderia ser encontrado nas camadas superficiais antes do preparo de solo.

Em outros estudos de natureza semelhante, onde os esquemas de amostragem viabilizaram o uso de métodos geoestatísticos para a avaliação da RP, no caso mapeamento por krigagem, as avaliações foram feitas antes da colheita e em plantios de eucalipto com mais de 15 anos de idade (FILHO et al., 2011; LIMA et al., 2010). Mesmo nessas condições, os autores também observaram descontinuidade espacial para a RP em algumas das camadas avaliadas, sobretudo nas zonas de maior influência do manejo.

Apesar da impossibilidade ou da inviabilidade de utilização da geoestatística, a determinação do número de amostras representativas da área amostral por meio de estatística clássica possibilitou compreender mais detalhadamente o comportamento aleatório da RP na área estudada (Figura 7). Como camada de referência para essa abordagem, adotou-se a camada de 0,20-0,40 m pois, em vários aspectos, essa representa uma condição intermediária de RP entre as demais profundidades. Diante da variação dos valores de RP na camada 0,20-0,40 m (CV= 32,71%, média dos sistemas de colheita), adotou-se 20 % de variação como erro esperado razoável para estimativa do número de amostras representativas da área. A observação do CV é fundamental para determinação do nível de precisão com que se deseja estimar determinado atributo do solo (GONTIJO et al., 2007). De acordo com esse critério, e para a condição desse estudo, seriam necessárias em média 10 amostras em 2,4 ha⁻¹ para representar as condições de RP das áreas (Figura 7).

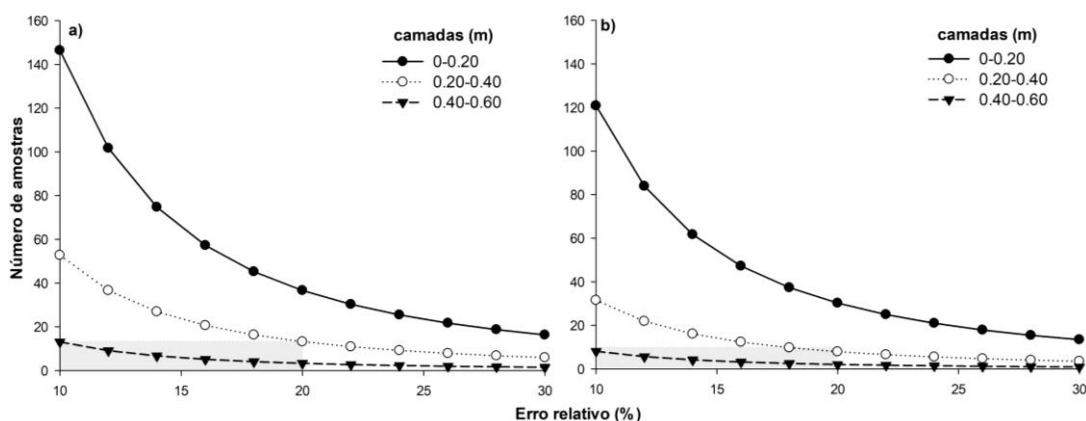


Figura 7. Número de amostras necessário para a estimativa da média da RP em relação a um erro relativo em torno da média ($p < 0,05$), nas camadas 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%), precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS).

CONCLUSÕES

Os diferentes níveis de resíduos culturais sobre a superfície do solo, oriundos dos sistemas de colheita harvester + forwarder e feller + skidder, no curto prazo, não proveram diferentes condições de RP após preparo de solo nas áreas de renovação do plantio.

O preparo de solo promoveu condições homogêneas e reduziu a RP consideravelmente no perfil do solo, porém, também foram percebidas contribuições do preparo de solo realizado no ciclo anterior (oito anos atrás).

Mesmo nas áreas sob condução de plantio, em ambos sistemas de colheita, os valores de RP estiveram abaixo do nível crítico (3MPa) para o desenvolvimento do eucalipto. Nesse caso, contribuições do preparo de solo anterior, bem como, das condições edáficas e operacionais durante a colheita atual foram percebidas. As quantidades de resíduos sobre o solo em cada sistema de colheita pouco afetaram o comportamento da RP no curto prazo.

A avaliação geoestatística nas áreas de renovação do plantio mostrou que o preparo de solo reduziu drasticamente a dependência espacial da RP, inviabilizando o uso das técnicas de mapeamento associadas ao método. O comportamento aleatório observado para RP permitiu que o número de amostras necessárias para a estimativa dessa variável fosse determinado através de técnicas da estatística clássica.

REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013.

AMIRINEJAD, A. A. et al. Geoderma Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. **Geoderma**, v. 160, n. 3–4, p. 292–303, 2011.

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

ARVIDSSON, J. et al. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 60, n. 1–2, p. 79–89, 2001.

BARIK, K. et al. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. **Catena**, v. 120, p. 122–133, 2014.

BENGOUGH, A.; MULLINS, C. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 341–358, 1990.

BORTOLAS, E. P.; STAHL, J.; MINATEL, R. Preparo de solo em áreas de reforma de Pinus e Eucalyptus com idade superior a 20 anos. **Anais da 45ª Reunião Técnico-Científica do PTSM , Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 93–98, 2013.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage & Research**, p. 205–217, 1997.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **USDA-ARS, National Soil Tilth Lab., Ames, IA.**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

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

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade Espacial da Resistência Mecânica à Penetração em Vertissolo Cultivado com Manga no Perímetro Irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 3, p. 755–763, 2012.

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

DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análises químicas do solo: metodologias**. Viçosa, MG, 1981.

DÉFOSSEZ, P. et al. Modelling the impact of declining soil organic carbon on soil compaction: Application to a cultivated Eutric Cambisol with massive straw exportation for energy production in Northern France. **Soil and Tillage Research**, v. 141, p. 44–54, 2014.

EBELING, C.; LANG, F.; GAERTIG, T. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 74–82, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2017.

FABIOLA, N. et al. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v. 113, n. 1–2, p. 95–108, 2003.

FILHO, G. R. et al. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 439–446, 2011.

GAERTIG, T. et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 159, n. 1–2, p. 15–25, 2002.

GEIST, J. M.; HAZARD, J. W.; SEIDEL, K. W. Assessing Physical Conditions of some Pacific Northwest Volcanic Ash Soils After Forest Harvest. **Soil Science**

Society of America, v. 53, p. 946–950, 1989.

GONÇALVES, S. B. et al. Efeito da profundidade de trabalho na qualidade da operação de subsolagem para implantação florestal. **Revista Arvoré**, v. 40, n. 1, p. 29–37, 2016.

GONÇALVES, S. B. et al. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, p. 224–229, 2017.

GONTIJO, I. et al. Planejamento amostral da pressão de consolidação de um Latossolo Vermelho Distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 1245–1254, 2007.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, n. 2, p. 163–189, 1980.

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

HATTORI, D. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 770–776, 2013.

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

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: Instituto Agrônomo do Paraná**. Disponível em: <www.iapar.br>. Acesso em: 10 dez. 2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

ISAAKS, H. E.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JAAFARI, A.; NAJAFI, A.; ZENNER, E. K. Ground-based skidder traffic changes

chemical soil properties in a mountainous Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest in Iran. **Journal of Terramechanics**, v. 55, p. 39–46, 1 out. 2014.

LIMA, C. G. D. R. et al. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 163–173, 2010.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 107–136, 2003.

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

MCDONALD, T. P.; SEIXAS, F. Effect of slash on forwarder soil compaction. **Journal of Forest Engineering**, v. 8, n. 2, p. 15–26, 1997.

MCQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 63, n. 3–4, p. 93–107, 2002.

MENDES, L.; BELING, R. R.; TREICHEL, M. **Anuário Brasileiro da Silvicultura**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016.

MISRA, R. K.; GIBBONS, A. K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. **Plant & Soil**, v. 182, p. 11, 1996.

NAJAFI, A.; SOLGI, A.; SADEGHI, S. H. Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 165–169, 2009.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 5–6, p. 547–551, 2000.

PETERSEN, R. G.; CALVIN, L. D. Sampling. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of**

soil analysis:Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. 1. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 54–71.

PINARD, M. A.; BARKER, M. G.; TAY, J. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 130, n. 1–3, p. 213–225, 2000.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3–4, p. 259–280, 2005.

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: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49–134.

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

ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences.Gamma Design Software**.Plainwell, Michigan USA, 2008.

ROCHA, S. P. DA et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de eucalipto implantado em diferentes métodos de preparo do solo. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 108, p. 965–977, 2015.

SANDS, R.; GREACEN, E. L.; GERARD, C. J. Compaction of sandy soils in radiata pine forest I, a penetrometer study. **Australian Journal of Soil Research**, v. 17, n. Woods 1976, p. 101–113, 1979.

SCHAEFER, T.; SOHNS, D. Reduction of soil compaction by covering soil with brushwood. **Allgemeine Forst Zeitschrift fuer Waldwirtschaft und Umweltvorsorge**, p. 452–455, 1993.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA, E. D. DE; SOUZA, C. R. DE. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da

madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 53, p. 9–16, 1998.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SINNETT, D. et al. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 273–280, 2008.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semadura direta. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 25, p. 699–707, 2001.

TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, , 2017. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>

VAZ, C. M. P. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; V.H., A. V.; SCHAEFER, G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1p. 1–54.

WARRICK, A. W. Spatial variability. In: HILLEL, D. (Ed.). **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655–675.

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, n. 8, p. 1196–1205, 1 ago. 2000.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses.**, v. 19, p. 1467 – 1476, 1988.

ZENNER, E. K.; BERGER, A. L. Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 10, p. 1785–1794,

2008.

ZOU, C. et al. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, v. 236, n. 1, p. 105–115, 2001.

CAPÍTULO II

ALTERAÇÕES DE CURTO PRAZO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARGILO-ARENOSO SOB MANEJO FLORESTAL MECANIZADO

RESUMO

O Brasil destaca-se mundialmente pelas altas produtividades das suas florestas plantadas. A mecanização contribui efetivamente, porém com alterações edáficas físicas que precisam ser avaliadas para assegurar a sustentabilidade da atividade florestal a médio e longo-prazo. Objetivou-se avaliar os efeitos cumulativos do conjunto de operações florestais mecanizadas (colheita e preparo do solo, principalmente) e sua atenuação por resíduos em superfície sobre as propriedades físicas do solo. O estudo foi realizado em fazenda da Klabin S/A em Telêmaco Borba - PR, Brasil, em área dominada por Latossolos Vermelhos argilo-arenosos. Os tratamentos consistiram de áreas renovadas (R) com manejo de resíduos (100% e 0%) e conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS). Transectos de amostragem foram alocados perpendicularmente às linhas de plantio coletando-se amostras indeformadas em pontos equidistantes demarcados a cada 0,50 m. Densidade do solo (D_s), porosidade (macro, micro e total), resistência do solo à penetração (RP), umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), permeabilidade do solo ao ar (K_a) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_s) foram determinadas nas amostras coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, enquanto a pressão de pré-consolidação (σ_p) e grau de compactação (GC) o foram nas camadas 0-0,30 e 0,30-0,60 m. Intervalos de confiança e correlações foram calculados considerando probabilidades de até 0,10 e 0,05, respectivamente. Nas áreas de renovação, as médias (0-0,60 m) de D_s foram significativamente menores em HF_{R0} ($1,21 \text{ kg dm}^{-3}$) e FS_{R0} ($1,24 \text{ kg dm}^{-3}$) em relação à HF_{R100} ($1,40 \text{ kg dm}^{-3}$). Nesse caso, o maior volume de resíduos em HF_{R100} contribuiu com esse resultado. Nas áreas de condução dos plantios, a média (0-0,60m) de D_s em HF_C ($1,30 \text{ kg dm}^{-3}$) foi significativamente menor em relação a FS_C ($1,46 \text{ kg dm}^{-3}$). Esses resultados estão associados ao menor volume de resíduos sobre a superfície do solo durante a colheita em FS_C . Não foram constatadas diferenças significativas para as médias de RP em HF_R e FS_R . Porém, as médias (0-0,60 m) de RP em HF_C ($1,23 \text{ MPa}$) foram significativamente menores que em FS_C

(2,00 MPa). Em poucas situações foram constatadas diferenças significativas para as médias de porosidade (macro, micro e total), K_s , K_a e GC, contudo o comportamento geral dessas variáveis estiveram associados às alterações na Ds e, em análise conjunta, indicaram que os diferentes tipos de manejo adotados promoveram alterações na estrutura do solo, percebidas no curto prazo. Nas presentes condições, as maiores quantidades de resíduos sobre a superfície do solo atenuaram os efeitos degradantes do tráfego na colheita sobre a estrutura do solo. Em contrapartida, em áreas de renovação do plantio, as maiores quantidades de resíduos prejudicaram o resultado final do preparo de solo. Na ausência do resíduos, o preparo de solo foi favorecido e resultou em perfis com melhores condições físicas para o desenvolvimento radicular das plantas de eucalipto.

Palavras-chave: Eucalipto, colheita, preparo do solo, resíduos culturais, propriedades físicas, permeabilidade ao ar.

SHORT TERM CHANGES IN PHYSICAL PROPERTIES OF A CLAYEY-SANDY OXISOL UNDER MECHANIZED FOREST MANAGEMENT

ABSTRACT

Brazil has been outstanding worldwide for the high yield of its planted forests. Among other factors, the mechanization of forest production systems contributes to obtaining high yield. However, the mechanized management practices promote edaphic changes, especially on the physical properties of the soil, which need to be evaluated to ensure the sustainability of the forestry activity within medium and long term. The objective of this study was to evaluate the cumulative effects of mechanized forest operations (harvesting and soil tillage) and their attenuation by surface residues on soil physical properties. The study was carried out on a Klabin S/A farm in Telêmaco Borba - PR, Brazil, in an area predominantly covered by Oxisol of sandy-clay texture. The treatments consisted of two harvesting systems (harvester + forwarder - HF and feller + skidder - FS) together with the forest renewal (R), followed by the management of cultural residues in which 100% and 0% of the total of residues produced at harvest were maintained, followed by soil tillage, or then by conduction of harvested crop (C). Sampling transects were allocated perpendicular to the planting lines and samples were collected in equidistant points at intervals of 0.50 m. Bulk density (Sd), porosity (macro, micro and total), soil penetration resistance (PR) and soil water content at field capacity (θ_{cc}) were determined in the samples collected in the layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.40 e 0.40-0.60 m, while soil air permeability (K_a), soil saturated hydraulic conductivity (K_s), pre-consolidation pressure (σ_p) and compaction level (GC) were in the layers 0-0.30 and 0.30-0.60 m. Confidence intervals and correlations were calculated considering probabilities of up to 0.10 and 0.05, respectively. In the forest renewal areas, the average (0-0.60 m) of Sd were significantly lower in HF_R0 (1.21 kg dm⁻³) and FS_R0 (1.24 kg dm⁻³) than in HF_R100 (1.40 kg dm⁻³). In this case, the higher volume of residue in HF_R100 contributed more to this result. In the areas maintaining forest, the average (0-0.60 m) of Sd in HF_C (1.30 kg dm⁻³) was significantly lower in relation to FS_C (1.46 kg dm⁻³). This result is associated to the lower volume of residue on the soil surface during FS_C harvesting. No significant difference was reported for the means of PR in HF_R and FS_R. However, the averages (0-0.60 m) of PR in HF_C (1.23 MPa) were significantly lower than in FS_C (2.00 MPa). In few situations, significant differences were observed for the porosity

(micro, macro, and total), K_s , K_a , GC and σ_p means, however, the general behavior of these variables was associated with changes in Sd and, in a joint analysis, indicated that the different types of management adopted promoted changes in soil structure, perceived in the short-term. Under these conditions, the higher level of residue on soil surface attenuated the degrading effects of harvest traffic on the soil structure. On the other hand, in areas of forest renewal, the higher level of residue impaired the final result of soil tillage.

Keywords: Eucalyptus, harvesting, soil tillage, harvest residue, physical proprieties, soil air permeability.

INTRODUÇÃO

O manejo mecanizado tem por finalidade otimizar os sistemas de produção e, simultaneamente, criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, além de aumentar a produtividade e ser economicamente eficiente. Também amplia o número de opções de práticas, porém a sua adoção não raramente é dependente de fatores de ordem logística e/ou econômica. Os impactos ocasionados pela mecanização tornam imprescindível a avaliação das perturbações edáficas causadas pelos diferentes tipos de manejo mecanizado, sobretudo sobre a qualidade física do solo. É preciso assegurar que a mecanização garanta a sustentabilidade a médio e longo prazos, qualquer que seja a atividade que faça o seu uso.

Atualmente, as florestas plantadas no Brasil ocupam 9,93 milhões de hectares, o que corresponde a apenas 1,2 % de todo o território nacional, sendo, contudo, responsáveis por 91 % de toda a madeira destinada à indústria no país. Estima-se que 6% do PIB brasileiro advenha do setor florestal (IBGE, 2016). Além da grande importância econômica para o país, o setor florestal tem se destacado por vários aspectos, porém dois deles merecem destaque e estão relacionados à redução dos tempos de rotação (plantio a colheita), para menos de sete anos e pela produtividade média de $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, porém com vários casos de áreas com produtividade acima $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (MENDES; BELING; TREICHEL, 2016). Tal condição tem levado a intensificação do uso da mecanização.

Na atividade florestal as operações de colheita e preparo de solo são consideradas as mais impactantes sobre os atributos físicos do solo. Esses impactos são decorrentes do alto *input* energético depositado no sistema durante essas operações basicamente associados ao peso e/ou potência mecânica do maquinário utilizado (ARVIDSSON et al., 2001), geralmente de grande porte. Os possíveis danos à estrutura do solo podem ser compensados por sistemas de colheita que viabilizem o uso dos resíduos vegetais dentro e/ou fora do talhão, pois parte deles podem permanecer sobre a superfície, atenuando os efeitos do tráfego, o que pode se tornar uma vantagem estratégica do manejo.

O preparo de solo é feito com a finalidade de mitigar a compactação ocasionada pela colheita, criando condições físicas para o desenvolvimento das raízes. A qualidade desta operação garante o êxito das operações subsequentes (plantio, adubações e os tratos culturais). No entanto, em áreas onde há forte

presença de resíduos culturais é necessária a remoção deste com máquinas de grande porte, visando facilitar o deslocamento dos implementos e, consequentemente, aumentar o rendimento operacional (BORTOLAS; STAHL; MINATEL, 2013). Embora a deposição de resíduos sobre o solo seja fundamental para atenuar os impactos do tráfego de máquinas (LOPES et al., 2015; MCDONALD; SEIXAS, 1997; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SEIXAS; OLIVEIRA; SOUZA, 1998), os efeitos cumulativos da colheita e do posterior preparo do solo sobre a qualidade física de solos florestais, à curto, médio e longo prazos, ainda são desconhecidos.

A deterioração da qualidade física de solos florestais pode ser ainda intensificada, comparativamente aos solos sob culturas anuais, por forças mecânicas aplicadas com o crescimento das raízes das árvores, pela carga única aplicada ao solo com a derrubada de grandes árvores, pelo levantamento e arraste de troncos e pelas condições de umidade do solo não raramente desfavoráveis ao tráfego no momento das operações (EBELING; LANG; GAERTIG, 2016; GREACEN; SANDS, 1980). Os principais impactos sobre as propriedades físicas do solo são o aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração de raízes e a redução do volume de macroporos, da infiltração, do movimento de água no solo e do fluxo interno de ar no solo (CAMBI et al., 2017; DÉFOSSEZ et al., 2014; GAERTIG et al., 2002; GYSI, 2001; HATTORI et al., 2013; LIPIEC; HATANO, 2003; MCQUEEN; SHEPHERD, 2002; NAJAFI; SOLGI; SADEGHI, 2009; PINARD; BARKER; TAY, 2000). Estas propriedades podem ser utilizadas como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas.

O tráfego de máquinas durante a operação de baldeio em colheita florestal semi-mecanizada resultou em aumento da densidade do solo superficial e consequente aumento da resistência à penetração em áreas trafegadas quando comparadas às não trafegadas (MARCHI et al., 2016). Os incrementos na densidade do solo inicial são mais intensos quando o número de passadas aumenta (CAMBI et al., 2017), considerando-se valores superiores a 15% como críticos ao desenvolvimento de raízes de espécies florestais (GEIST; HAZARD; SEIDEL, 1989). A produtividade de eucalipto em área sob condução de rebrota, colhida mecanicamente, apresentou correlação negativa entre volume de madeira e resistência do solo à penetração e a densidade do solo (DEDECEK; GAVA, 2005; RIBEIRO et al., 2010), bem como com outras características dendrométricas. A

grande maioria dos autores estabelece o valor crítico ≥ 3 MPa como limitador ao desenvolvimento de espécies florestais, a partir do qual pode haver severa restrição ao crescimento (SANDS; GREACEN; GERARD, 1979). O valor de 4,5 MPa foi limitante para mudas de eucalipto (MISRA; GIBBONS, 1996). É importante considerar que a taxa de crescimento radicular diminui exponencialmente com o aumento da resistência do solo à penetração, mesmo em valores de resistência abaixo do considerado crítico para o crescimento radicular (ZOU et al., 2001).

A macroporosidade é o componente da porosidade total mais afetado com os danos à estrutura do solo, o que comumente não ocorre com a microporosidade, podendo ser inclusive aumentada com a compactação do solo (AMPOORTER et al., 2007). A maioria dos fenômenos físicos do solo ocorrem no espaço poroso ocupado por ar e o volume de macroporos $< 0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ é considerado como limite crítico para o desenvolvimento da maioria das espécies (LIPIEC; HATANO, 2003; SCHJØNNING et al., 2003), contudo são informações estáticas. As medidas de permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica, por exemplo, podem indicar melhor as alterações na dinâmica do fluxo de ar e água no solo quando o mesmo é submetido ao tráfego de máquinas (ANGHINONI et al., 2017; STRUDLEY; GREEN; ASCOUGH, 2008a).

Os indicadores de qualidade física comentados podem sinalizar a necessidade de preparo de solo, o diagnóstico das condições físicas do solo após a sua realização, bem como serem utilizados para a adoção de medidas preventivas. A prevenção à compactação do solo deve ser preferida frente à sua correção, visto que, os efeitos da compactação podem persistir ao longo do tempo e as práticas de mitigação são onerosas e requerem um esforço mecânico muito grande por parte das máquinas (EBELING; LANG; GAERTIG, 2016). A identificação de locais críticos com maior susceptibilidade à compactação possibilita a realização de manejo específico, evitando assim a compactação adicional.

A avaliação do impacto das operações mecanizadas sobre as propriedades físicas do solo em diferentes sistemas de manejo, em particular àqueles relacionados às florestas comerciais, pode contribuir para a manutenção da qualidade física do solo, além de aumentar o conhecimento sobre a dinâmica desses sistemas. Essas informações podem ser parte fundamental de um plano de manejo florestal consistente, o qual deve envolver a prevenção da degradação física do solo,

juntamente com a otimização das ações de mitigação (ARVIDSSON et al., 2001; GONÇALVES et al., 2017; ZENNER; BERGER, 2008).

Nesse contexto, considerando que o manejo florestal contínuo de uma mesma área, com práticas mecanizadas de preparo de solo, colheita e demais tratamentos culturais envolvidos, repetidos em ciclos de tempos cada vez menores, podem levar a alterações cumulativas das propriedades físicas do solo, objetivou-se avaliar as alterações do conjunto de práticas mecanizadas envolvidas na colheita e preparo do solo e sua atenuação por resíduos em superfície sobre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico argilo-arenoso sob cultivo de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

Características da área e descrição dos tratamentos

A área experimental está localizada sob plantio florestal na Fazenda Monte Alegre (bloco BRM-J9A), pertencente a Empresa Klabin S/A, município de Telêmaco Borba-PR (24°18'15'' S e 50°36'39'' W e a 770 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa e Cfb, ou seja, clima subtropical com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e no mês mais quente acima de 22°C, verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, porém sem uma estação seca definida. A umidade relativa e a precipitação média anual situam-se entre 70 a 75 % e entre 1.400 a 1.600 mm, respectivamente (IAPAR, 2000). A classe de solo dominante na área é Latossolo Vermelho distrófico e o relevo é suavemente ondulado (Tabela 1). O solo apresenta classe textural variando de média argilosa à média arenosa (EMBRAPA, 2013) (Tabela 1).

O bloco BRM-J9A apresenta histórico de uso com plantios comerciais de florestas há aproximadamente três décadas, tendo sido conduzido inicialmente um ciclo de eucalipto de aproximadamente 20 anos, alterado para ciclos de 8 anos a partir de setembro de 2008. Esse último povoamento florestal foi colhido em novembro de 2016, sendo composto de híbridos oriundos do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, clone 12/52. O espaçamento utilizado foi de 2,50 m entre plantas e 3,50 m entre linhas de plantio, totalizando 1.142 árvores ha⁻¹. Esse povoamento apresentou os seguintes indicadores: altura média do dossel de

19,50 m, diâmetro médio a altura do peito de 0,16 m e o incremento médio anual com casca aos 7 anos de $65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Nessa área foi instalado experimento de longa duração composto por dois tratamentos que retratam os sistemas de colheita adotados na empresa, no caso definidos pelo equipamento utilizado normalmente nas operações de colheita, sendo: harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS). Nas áreas colhidas por cada um dos sistemas de adotados (HF e FS) também foram implantados tratamentos diferenciados quanto à quantidade e natureza dos resíduos vegetais produzidos durante essas operações, no caso a manutenção de 100%, 50% e 0% dos resíduos culturais sobre a superfície (Figura 1a). Assim, no sistema de colheita HF, 100% representa os resíduos produzidos durante a colheita (cascas, galhos, folhas, ponteiros, etc.), os quais são mantidos juntamente com a serapilheira remanescente da floresta que se encontra sobre o solo; 50% representa a remoção dos resíduos produzidos na colheita e permanência da serapilheira remanescente da floresta; e 0% representa a remoção total dos resíduos produzidos na colheita, juntamente com a serapilheira remanescente da floresta. Em contrapartida, para o sistema FS, 100% é referente aos resíduos produzidos fora do talhão (ponteiros), os quais são retornados à área e espalhados sobre a serapilheira remanescente da floresta; 50% corresponde a permanência da serapilheira remanescente da floresta; 0% corresponde à remoção total da serapilheira remanescente da floresta (Figura 1a). Contudo, no presente estudo considerou-se apenas as situações extremas em relação a quantidade de resíduos nos dois sistema de colheita adotados (100% e 0%).

Na área experimental anteriormente descrita foi realizada a renovação do plantio, onde, após a colheita e manejo dos resíduos (remoção ou adição) sobre a superfície, foi realizado o preparo do solo, sendo composto por uma subsolagem a 0,50 m de profundidade, utilizando um trator de esteira equipado com um subsolador de 1 haste. Em seguida o plantio foi realizado manualmente, no dia 16/03/2017, utilizando mudas de eucalipto clone I144, no espaçamento de 1,82 m entre plantas e 3,30 m entre linhas de plantio, totalizando $1.666 \text{ árvores ha}^{-1}$. Adjacentes às áreas citadas, foram mantidas outras duas sob condução de rebrota, também colhidas pelos dois sistemas de colheita (HF e FS), porém nestas não foi feito o preparo do solo e o nível de resíduo permaneceu da forma que originalmente cada sistema de colheita é operacionalizado em campo, ou seja, no sistema HF houve acúmulo de resíduo da

colheita sobre a superfície do solo e, no sistema FS não houve acúmulo de resíduo da colheita sobre a superfície.

Assim, os tratamentos estabelecidos na área experimental consistiram dos dois sistemas de colheita (HF ou FS) em conjunto com a renovação do plantio (R) precedida do manejo de resíduos culturais (100% ou 0%) ou a condução do plantio colhido (C) (Figura 1a).

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas de condução do plantio colhido (C) e de renovação do plantio (R) com resíduos sobre a superfície (100%, 50% e 0%), oriundos de sistemas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS)

Camada (m)	Atributos químicos ¹							Granulometria ²				
	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	MO	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa
		mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			dag kg ⁻¹			kg kg ⁻¹	
HF_R (100, 50 e 0)												
0-0,20	5,0	2,1	47,0	2,49	0,54	0,59	8,90	3,76	0,28	0,10	0,36	0,26
0,20-0,40	4,8	1,8	23,0	2,44	0,45	0,49	7,30	3,49	0,30	0,09	0,34	0,26
0,40-0,60	4,5	1,4	15,0	0,52	0,16	1,18	6,50	2,02	0,31	0,11	0,32	0,26
HF_C												
0-0,20	4,4	2,2	23,0	0,31	0,39	2,06	10,20	3,63	0,32	0,11	0,30	0,26
0,20-0,40	4,2	1,3	8,0	0,00	0,12	1,67	6,30	1,75	0,32	0,11	0,29	0,25
0,40-0,60	4,2	1,1	4,0	0,02	0,12	1,47	6,00	1,48	0,30	0,12	0,31	0,27
FS_R (100, 50 e 0)												
0-0,20	4,3	1,6	15,0	0,23	0,13	1,76	9,10	3,09	0,35	0,06	0,27	0,32
0,20-0,40	4,2	1,4	12,0	0,18	0,09	1,76	8,60	2,42	0,37	0,07	0,27	0,29
0,40-0,60	4,1	1,0	6,0	0,02	0,06	1,57	7,90	2,28	0,39	0,07	0,26	0,28
FS_C												
0-0,20	4,2	2,0	27,0	0,19	0,14	2,65	9,50	4,03	0,33	0,09	0,29	0,27
0,20-0,40	4,2	1,3	8,0	0,03	0,07	2,06	7,90	2,55	0,27	0,14	0,31	0,27
0,40-0,60	4,1	1,3	6,0	0,01	0,07	1,96	8,90	2,28	0,23	0,19	0,33	0,28

⁽¹⁾Atributos químicos: pH H₂O determinado por potenciometria (relação solo:solução 1:2,5); K⁺ e P disponível extraídos com Mehlich-1 e determinados com fotometria de chama e espectrometria, respectivamente; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por fotometria e titulometria (DEFELIPO; RIBEIRO, 1981); H+Al acidez total extração com Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinado por titulometria; MO: matéria orgânica do solo determinada pelo método Walkey-Black (YEOMANS; BREMNER, 1988). ⁽²⁾Granulometria: Determinação pelo método da pipeta após dispersão química com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e física por agitação vertical por 16hs (50 rpm) de TFSA. Areia grossa e areia fina foram separadas em peneira de 0,053 e 0,210 mm, respectivamente, com posterior separação de silte e argila por sedimentação (EMBRAPA, 2017).

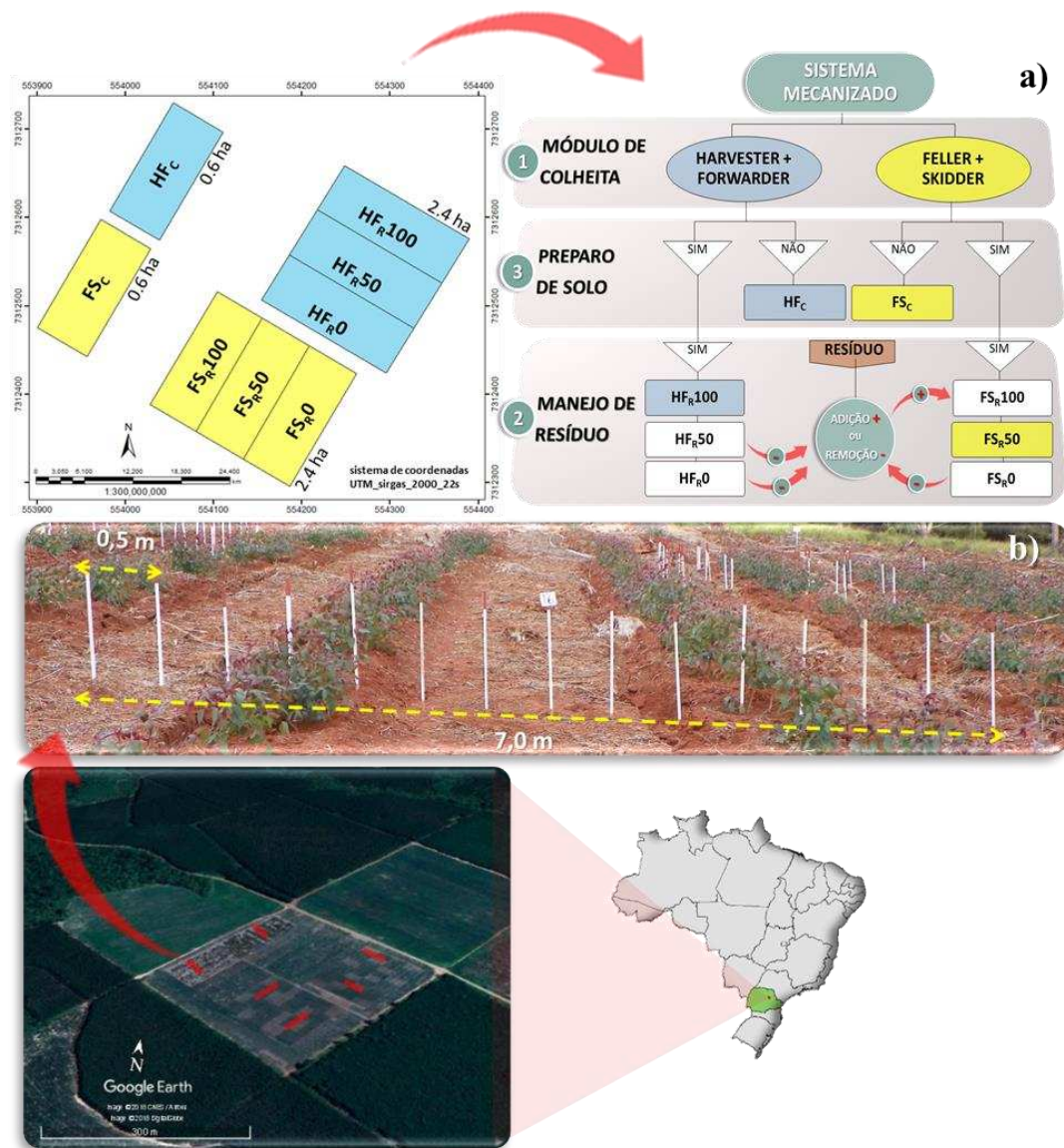


Figura 1. (a) Disposição dos tratamentos e fluxograma dos sistemas de colheita, respectivos tratamentos e sequência de execução das operações, polígonos de mesma cor (coloridos) representam tratamentos que possuem os mesmos níveis e tipos de resíduos gerados originalmente na forma como a colheita é operacionalizada em campo. (b) Localização da área e transecto de amostragem, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100%, 50% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS).

Amostragem e análises de solo

A amostragem foi realizada no período de 15 a 30 de julho de 2017, cerca de 120 dias após o preparo de solo. Em cada tratamento dos sistemas de colheita HF e FS foi alocado um transecto de amostragem, tendo sete metros de comprimento, posicionado perpendicularmente às linhas de plantio, abrangendo condições de solo

em duas linhas e duas entrelinhas de plantio (Figura 1b). A coleta das amostras foi feita em pontos equidistantes demarcados a cada 0,50 m ao longo do transecto, totalizando 15 pontos (repetições) (Figura 1b). A distância relativamente curta entre pontos de amostragem foi adotada em função das potenciais fontes de variabilidade física observadas nas áreas, tais como: linhas de subsolagens de plantios passados, marcas atuais de rodado do maquinário, presença de tocos, sulcos formados pelo arraste de troncos etc. O esquema de amostragem adotado visa a maior representatividade das possíveis condições físicas heterogêneas encontradas no perfil do solo dos tratamentos amostrados.

Amostras de solo indeformadas foram coletadas utilizando amostradores Uhland em cilindros metálicos de 0,05 x 0,05m para determinação das variáveis: densidade do solo (D_s), porosidade (macro, micro e total), resistência do solo à penetração (RP), umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), permeabilidade do solo ao ar (K_a) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_s). Para as variáveis pressão de pré-consolidação (σ_p) e grau de compactação (GC) foram utilizados cilindros de 0,07 x 0,025 m. A coleta para determinação das variáveis D_s , porosidade, RP e θ_{cc} foram feitas na profundidade média das camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, enquanto para K_a , K_s , σ_p e GC, as camadas coletadas foram 0-0,30 e 0,30-0,60 m.

A densidade do solo (D_s) foi obtida pela relação entre massa do solo seco (M_{ss}) e o volume da amostra de solo confinada no anel (V_s), conforme a equação: $D_s(kg\ dm^{-3}) = M_{ss}/V_s$. A porosidade total do solo (P_{tot}) foi obtida pela relação entre D_s e D_p , sendo esse quociente subtraído de uma unidade, conforme a equação: $P_{tot}(m^3m^{-3}) = 1 - (D_s/D_p)$. As variáveis microporosidade (P_{mic}) e umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) foram obtidas equilibrando as amostras indeformadas à uma tensão de -6 kPa e -10 kPa em câmara de Richards, respectivamente, e calculada por diferença de massas (M_{su} e M_{ss}) nas respectivas tensões, dividida por V_s , conforme a equação: $P_{mic}\ ou\ \theta_{cc}(m^3m^{-3}) = (M_{su} - M_{ss})/V_s$. A macroporosidade (P_{mac}) foi calculada por meio da diferença entre as variáveis P_{tot} e P_{mic} .

A resistência a penetração (RP) foi determinada em amostras equilibradas à tensão de -10 kPa (correspondente à umidade na capacidade campo), utilizando penetrômetro de bancada (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), adotando-se velocidade de penetração de $0,01\ m\ min^{-1}$ até a profundidade de 0,05 m.

A determinação da condutividade hidráulica (K_s) foi feita pela aplicação de carga constante exercida por uma lâmina de água de 0,02 m sobre as amostras de solo saturada (EMBRAPA, 2017). A K_s foi calculada conforme a equação baseada na Lei de Darcy, sendo: $K_s \text{ (cm h}^{-1}\text{)} = (Q * L)/(a * h * t)$; onde Q é volume do percolado (mL); L é a altura do bloco do solo (cm); h é a altura do bloco do solo e da coluna (cm); a é a área do cilindro (cm²) e t é o tempo (h). As médias de K_s foram classificadas da seguinte forma: lenta ($K_s \leq 0,50 \text{ cm h}^{-1}$), moderada ($0,50 > K_s \leq 6,50 \text{ cm h}^{-1}$) e rápida ($K_s > 6,5 \text{ cm h}^{-1}$) (FERREIRA, 1999).

A permeabilidade ao ar (K_a) foi determinada em amostras equilibradas à tensão de -10 kPa, utilizando permeâmetro de carga constante de ar (FIGUEIREDO, 2010), tendo sido calculada pela equação: $K_a \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = Q \eta / A_s (Z/P)$; onde Q é a vazão mássica (m³ s⁻¹); η é a viscosidade do ar a 20 °C (N s m⁻²); A_s é a área perpendicular ao movimento do ar (m²); z é a coluna de solo (m); e P é a pressão diferencial de ar (Pa).

No ensaio de compressão uniaxial para obtenção da pressão de pré-consolidação (σ_p) foi utilizado consolidômetro eletrônico automático (SILVA; LANÇAS; JUNIOR MASQUETTO, 2007) e amostras equilibradas à -10 kPa. Em seguida foram aplicadas pressões sucessivas e constantes de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, por cinco minutos em cada carga, tempo suficiente para atingir 99 % da máxima deformação do solo (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000). Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, para a determinação da densidade do solo. Os valores de σ_p (kPa) derivados das curvas de compressão foram obtidos pelo método de Casagrande (SILVA; LIMA, 2016). O GC foi determinado por meio da relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade na pressão de 1.600 kPa ($D_{s_{máx}}$), obtida no teste de compressão uniaxial, conforme a equação: $GC \text{ (}\%\text{)} = (D_s/D_{s_{máx}}) * 100$.

Análise estatística

O comportamento estatístico das variáveis foi analisado por meio de estatística exploratória descritiva com o intuito de eliminar possíveis valores discrepantes (outliers). As medidas de estatística descritiva determinadas foram: média, mediana, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação. O coeficiente de variação (CV%) foi classificado como: baixo ($CV < 15\%$), médio ($15 \geq CV \leq 50\%$) e alto ($CV > 50\%$) (WARRICK, 1998). Também foi testada a

normalidade da distribuição por meio do teste de Shapiro-Wilk, considerando como distribuição normal os dados que obtiveram resultado de p-valor $>0,05$, ou seja, valor não significativo ao nível de 95% de probabilidade (SHAPIRO; WILK, 1965). A ausência de normalidade foi constatada somente para K_a , K_s e σ_p , o que levou a transformação logarítmica dos valores referente a essas variáveis, o que permitiu o ajuste dos dados à distribuição próxima da normalidade (BLACKWELL et al., 1990).

Os intervalos de confiança para população normal (IC) das médias de RP foram determinados levando-se em consideração o número de amostras (n) e o desvio-padrão da amostra (S), com nível de confiança de 90 % (PAYTON; MILLER; RAUN, 2000). Foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) (PEARSON, 1895) e, também, os coeficientes de correlação não-linear de dependência aleatória ou randomizada (RDC) (LOPEZ-PAZ; HENNIG; SCHÖLKOPF, 2013). O nível de significância das correlações entre as variáveis foi verificado por meio do teste t de Student ao nível de 95% de confiança. Os coeficientes de correlação linear e não-linear, bem como a existência de significância, foram apresentados em matrizes de correlação (*corrgrams*) (FRIENDLY, 2002). Os dados utilizados na análise de correlação foram referentes às médias das variáveis obtidas de 0- 0,60 m de profundidade no perfil.

A verificação de normalidade, assim como as análises de estatística descritiva, cálculos dos intervalos de confiança e as correlações entre as variáveis físicas foram efetuadas por meio do software R 3.4.3 (R Core Team, 2017). No software R, as curvas de compactação foram obtidas utilizando o pacote *soilphysics* (SILVA; LIMA, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) apresentou valores mínimos de 1,18 e 1,21 kg dm⁻³ e máximos de 1,48 e 1,58 kg dm⁻³, com médias de 1,30 e 1,33 kg dm⁻³ nos sistemas de colheita HF (HF_R e HF_C) (Figura 2a) e FS (FS_R e FS_C) (Figura 2b), respectivamente. Os coeficientes de variação das médias (CV) nas camadas foram classificados como baixos, sendo constatada a redução gradativa do CV com o

aumento da profundidade, também confirmada pela redução da amplitude dos intervalos de confiança.

Nas áreas de renovação do plantio não foram encontradas diferenças significativas para as médias de Ds entre as camadas, independentemente do sistema de colheita adotado e da quantidade de resíduos. A exceção foi verificada para o tratamento HF_R100 que apresentou Ds média na camada 0,10-0,20 m igual a $1,48 \pm 0,03 \text{ kg dm}^{-3}$, significativamente maior que as camadas de 0-0,10 m e 0,40-0,60 m ($1,34 \pm 0,07$ e $1,35 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente) (Figura 2a). As diferenças nas médias de Ds entre as camadas são indicativas de que os efeitos do preparo de solo sobre a densidade do solo foram menos homogêneos no perfil do tratamento HF_R100, comparativamente aos demais.

Nos tratamentos de condução dos plantios houveram diferenças significativas entre as camadas para ambos sistemas de colheita, sendo que em HF_C, as médias de Ds nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m ($1,33 \pm 0,04$, $1,36 \pm 0,03$ e $1,31 \pm 0,03 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente) foram maiores que a média da camada 0,40-0,60 m ($1,21 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$) (Figura 2a). De modo similar, em FS_C, as menores médias foram observadas na camada 0,40-0,60 m ($1,36 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$), havendo, porém, aumento da Ds na camada 0,10-0,20 m ($1,58 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$), em relação às demais (Figura 2b). A diminuição da densidade em profundidade é resultante da dissipação das forças aplicadas em profundidade pelo maquinário (ALAKUKKU et al., 2003; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

O preparo do solo resultou em médias de Ds significativamente menores em HF_R0 comparativamente às respectivas camadas de HF_R100 ($1,21$ e $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente), quando considerou-se todo o perfil do solo estudado (0-0,60 m) (Figura 2a). Esses resultados podem estar relacionados a presença de maior quantidade de resíduos sobre a superfície típica em HF (+espesso), comparativamente a FS (-espesso), o que limitou a profundidade de ação do implemento de preparo usado, afetando a qualidade final do preparo (BORTOLAS; STAHL; MINATEL, 2013), sendo necessária sua remoção para viabilizar a operação mecanizada.

Outra possibilidade é a condução do preparo de solo ter sido feita em condições de umidade diferenciada, uma vez que o maior volume de resíduos sobre a superfície do solo em HF_R100 pode ter contribuído para manutenção de maior quantidade de água no solo, comparativamente àquele em que houve remoção total

de resíduos (HF_R0 e FS_R0) ou camada de resíduos menos espessa (FS_C), principalmente no caso em que o preparo tenha sido antecedido de período chuvoso. A água no solo tem efeito lubrificante, o que pode facilitar o ajuste de partículas e reduzir a resistência dos agregados à deformação física (DEXTER, 2004), promovendo o aumento da densidade do solo com o aumento do conteúdo de água quando pressões sobre o solo são exercidas, inclusive com comprometimento de produtividade do eucalipto (SILVA; DE BARROS; BOAS, 2006).

Destacam-se, ainda, as médias de D_s significativamente maiores nas camadas 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de HF_R100 em relação às respectivas camadas de HF_C . A média de D_s em HF_C foi de $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$ quando considerou-se todo o perfil do solo estudado (0-0,60 m) (Figura 2a). Esses resultados não eram esperados, pois é de se esperar que a operação de preparo promova menores valores de densidade no perfil do solo preparado, quando comparado a áreas sem preparo de solo. Entretanto, as médias de D_s das camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m ($1,33 \pm 0,04$, $1,36 \pm 0,03$ e $1,31 \pm 0,03 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente) de HF_C foram significativamente maiores para as mesmas em HF_R0 ($1,18 \pm 0,06$, $1,22 \pm 0,05$ e $1,22 \pm 0,04 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente). Apenas as médias das camadas 0,40-0,60 m desses tratamentos (HF_C e HF_R0) foram estatisticamente semelhantes. Essas observações reforçam a proposição de que a presença de espessa camada de resíduos influenciou negativamente o preparo do solo sobre a D_s no perfil do solo, tendo em vista que os resíduos de HF_R0 foram completamente removidos.

As áreas de renovação de plantio e colhidas pelo sistema FS apresentaram médias no perfil do solo de 1,29 e $1,24 \text{ kg dm}^{-3}$ para os tratamentos FS_R100 e FS_R0 , respectivamente (Figura 2b). Nessas mesmas áreas, apenas as médias de D_s das camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m ($1,32 \pm 0,03$ e $1,32 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente) de FS_R100 foram significativamente maiores em relação às respectivas camadas avaliadas em FS_R0 ($1,22 \pm 0,02$ e $1,21 \pm 0,03 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente) (Figura 2b). Esses resultados corroboram ainda mais o fato de que a qualidade do preparo de solo nas camadas mais profundas foi prejudicada pela presença física de resíduos na superfície do solo. Quanto à área de plantio em condução (FS_C) e sem preparo do solo, as médias de D_s nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,40-0,60 m foram significativamente maiores em relação às respectivas camadas nos tratamentos com preparo de solo (FS_R). Desse modo, apenas a média da camada 0,40-0,60 m ($1,36 \pm 0,02 \text{ kg dm}^{-3}$) não se diferenciou estatisticamente das médias das camadas

0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m ($1,29 \pm 0,06$, $1,32 \pm 0,03$ e $1,32 \pm 0,02$ kg dm⁻³, respectivamente) de FS_R100, que apresentou média no perfil (0-0,60) de $1,46$ kg dm⁻³.

As camadas avaliadas em FS_C apresentaram maior Ds em relação às respectivas camadas em HF_C, com destaque para camada 0,10-0,20 m em FS_C, cuja média foi de $1,58 \pm 0,02$ kg dm⁻³, sendo o maior valor observado dentre todos os demais tratamentos (Figura 2b). Valores de densidade $\geq 1,50$ kg dm⁻³ podem restringir o desenvolvimento da maioria das culturas (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003), e, no caso do eucalipto, a produtividade de rebrota pode ser afetada em densidades $\geq 1,60$ kg dm⁻³ (DEDECEK; GAVA, 2005). A maior densidade do solo ($1,70$ kg dm⁻³) (RIBEIRO et al., 2010) pode reduzir a taxa de absorção de P pelas plantas, promovendo a diminuição do crescimento do eucalipto. Apesar das particularidades de cada estudo, esses valores servem de indicativo das possíveis restrições ao desenvolvimento que as plantas de eucalipto podem enfrentar estando o solo em condições críticas de densidade.

O aumento da Ds em FS_C certamente está relacionado a menor quantidade de resíduos sobre a superfície do solo, pois há relatos dos efeitos positivos da presença dos resíduos florestais sobre a atenuação da compactação do solo (LOPES et al., 2015; MCDONALD; SEIXAS, 1997; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SEIXAS; OLIVEIRA; SOUZA, 1998) como também negativos pela sua não presença (JESUS et al., 2015). Os resíduos orgânicos formam uma camada protetora sobre a superfície, o que diminui o contato e pressão da máquina sobre a superfície do solo, ajudando a dissipar a pressão aplicada pela massa do maquinário, diminuindo os riscos de compactação adicional (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

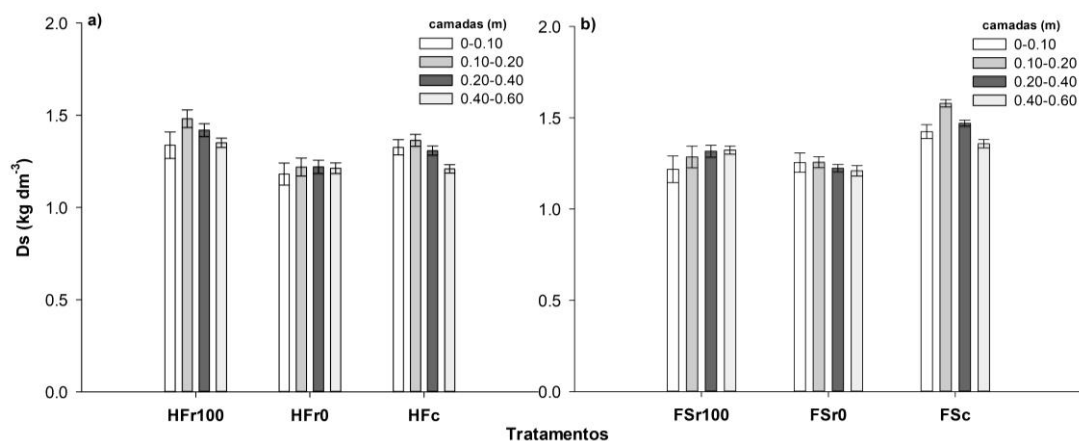


Figura 2. Médias de densidade do solo (D_s) nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Resistência do solo à penetração

Os conteúdos de água correspondentes à capacidade de campo do solo (θ_{cc}) nos quais foram feitas as determinações da resistência do solo à penetração (RP) apresentaram médias de 0,35 e 0,36 $m^3 m^{-3}$ para os sistemas de colheita HF (HF_R e HF_C) (Figura 3a) e FS (FS_R e FS_C) (Figura 3b), respectivamente. O CV das médias, em ambos os casos, foi classificado como baixo e a amplitude dos intervalos de confiança entre as camadas foi relativamente uniforme, com exceção da camada 0-0,10 m de HF_R e FS_R , os quais apresentaram amplitude um pouco maior que as camadas subsuperficiais, mas ainda inferior à 15%. Nesses casos não foram constatadas diferenças significativas para as médias de θ_{cc} entre camadas, independentemente da quantidade de resíduos envolvidos sobre a superfície. Porém, em HF_C e FS_C , as médias de θ_{cc} das camadas 0,40-0,60 m foram significativamente menores em relação às camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, tanto em HF (Figura 3a) quanto FS (Figura 3b).

As diferenças entre os valores médios de θ_{cc} , qualquer que seja a condição de estudo, foram pequenas e na maioria dos casos não significativas, o que é um indicativo de que os conteúdos de água nos quais a RP foi determinada foram semelhantes, havendo, portanto, pouca influência da umidade sobre as medidas de RP. Nessas condições espera-se encontrar melhores correlações entre as variáveis resistência do solo à penetração e densidade do solo (BUSSCHER et al., 1997; MORAES et al., 2012; TORMENA et al., 2002; VAZ et al., 2011).

A resistência a penetração (RP) apresentou médias de 1,31 e 1,62 MPa, com valores mínimos de 0,78 e 1,02 MPa e máximos de 1,72 e 3,07 MPa, nos sistemas de colheita HF (HF_R e HF_C) (Figura 4a) e FS (FS_R e FS_C) (Figura 4b), respectivamente. Os CVs das médias de RP nas camadas do solo foram classificados como médios, exceto nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m do FS_C , sendo classificados como baixos. Em quase todas situações houve diminuição gradativa do CV com o aumento da profundidade, assim como ocorrido para D_s , confirmada pela redução da

amplitude dos intervalos de confiança. Isso ocorre normalmente por conta da maior susceptibilidade das camadas superficiais às ações relacionadas ao tráfego das máquinas e arraste dos troncos quando comparadas às camadas mais profundas do solo (SOUZA et al., 2001).

Não foram encontradas diferenças significativas para as médias de RP entre camadas em HF_{R0} (Figura 4a) e FS_{R0} (Figura 4b), o que também ocorreu em FS_{R100} (Figura 4b), o que indica que nessas áreas o preparo de solo foi eficiente em criar condições homogêneas de RP até a profundidade de trabalho alcançada. Porém, em HF_{R100}, a média de RP da camada 0-0,10 m ($0,90 \pm 0,23$ MPa) foi significativamente menor que as médias das camadas 0-0,10-0,20 e 0,20-0,40 m ($1,72 \pm 0,37$ e $1,37 \pm 0,19$ MPa, respectivamente) e semelhante à camada 0,40-0,60 m ($1,11 \pm 0,13$ MPa). Já, as médias das camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foram estatisticamente iguais, porém, a média da camada de 0,20-0,40 m foi significativamente maior que na camada de 0,40-0,60m (Figura 4a). Essas variações entre profundidades indicam que apesar do preparo de solo ter ocasionado a diminuição da RP na primeira camada, essa condição não se estendeu uniformemente no perfil do solo, o que pode ter sido ocasionado pela presença de resíduos nessas áreas.

Quanto às áreas de condução do plantio, constatou-se que em HF_C, as médias de RP das camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m ($1,49 \pm 0,25$; $1,48 \pm 0,21$ e $1,19 \pm 0,11$ MPa, respectivamente) foram significativamente maiores a que a camada 0,40-0,60 m ($0,78 \pm 0,10$ MPa), enquanto as médias das demais camadas foram estatisticamente iguais (Figura 4a). As camadas superficiais estão mais sujeitas aos efeitos do tráfego e normalmente apresentam maior RP em relação às camadas subsuperficiais. De modo similar, FS_C apresentou as menores médias de RP observadas na camada 0,40-0,60 m ($1,30 \pm 0,13$ MPa), havendo, porém, aumento da média na camada 0,10-0,20 m ($3,07 \pm 0,35$ MPa) em relação às demais camadas avaliadas (Figura 4b). Destaca-se, ainda, que na camada 0,10-0,20 m ocorreu a única situação, dentre todas avaliadas, em que a RP esteve acima do nível considerado crítico ($RP > 3$ MPa) para o crescimento radicular do eucalipto (MISRA; GIBBONS, 1996; SANDS; GREACEN; GERARD, 1979; SINNETT et al., 2008). Assim como para a variável Ds, possivelmente o aumento da RP desse tratamento esteja associado à ausência de resíduos sobre a superfície do solo durante as operações de colheita florestal.

As médias de RP no perfil do solo (0-0,60 m) de HFR100, HFR0 e HFC foram de 1,27, 1,40 e 1,23 MPa, respectivamente (Figura 4a), e, de modo geral, não foram constatadas diferenças significativas entre as respectivas camadas, com exceção da camada de 0,40-0,60 m de HFC que, apesar de não ter se diferenciado da camada 0-0,10 m de HFC100, ainda assim apresentou valores médios significativamente menores em relação a todas as outras camadas avaliadas dos demais tratamentos (Figura 4a). A ausência de diferenças significativas entre tratamentos indicou que a RP foi menos sensível que a Ds na detecção de diferenças no estado de compactação das camadas avaliadas, apesar da conhecida correlação entre essas variáveis (BUSSCHER et al., 1997; MORAES et al., 2012; TORMENA et al., 2002; VAZ et al., 2011). A alta amplitude de variação dos valores de RP, sobretudo nas áreas com preparo de solo (DEDECEK; GAVA, 2005), está associada a esses resultados.

Nas áreas de FSR também foram encontradas poucas diferenças significativas para RP entre as respectivas camadas avaliadas. Contudo, em FSR100, a camada 0-0,10 m ($1,02 \pm 0,33$ MPa) apresentou média significativamente menor em relação às médias das respectivas camadas de FSR0 e FSC ($1,75 \pm 0,38$ e $1,67 \pm 0,24$ MPa, respectivamente). Ainda, em FSC, as médias de RP nas camadas de 0,10-0,20 e 0,40-0,60 m ($3,07 \pm 0,35$ e $1,96 \pm 0,16$ MPa, respectivamente) foram significativamente maiores que as observadas nas respectivas camadas de FSR100 ($1,31 \pm 0,31$ e $1,40 \pm 0,19$ MPa, respectivamente) e FSR0 ($1,62 \pm 0,23$ e $1,53 \pm 0,16$ MPa, respectivamente). As médias de RP no perfil desses tratamentos foram de 1,29, 1,56 e 2,00 MPa, para FSR100, FSR0 e FSC, respectivamente (Figura 4b).

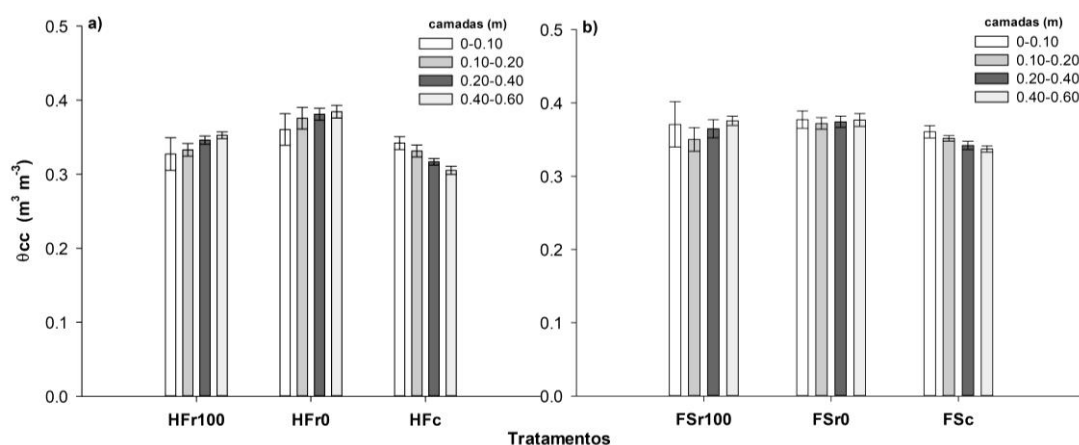


Figura 3. Médias de umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto

com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

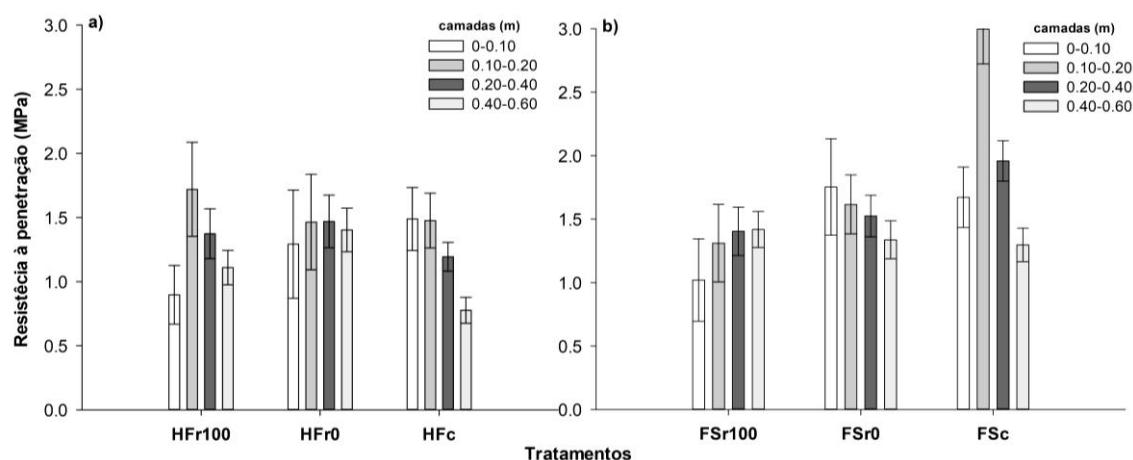


Figura 4. Médias de resistência do solo à penetração (RP) nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Porosidade do solo

O volume de macroporos do solo (P_{mac}) apresentou médias de 0,14 e 0,12 m^3m^{-3} , com valores mínimos de 0,08 e 0,04 m^3m^{-3} e máximos de 0,22 e 0,16 m^3m^{-3} em HF (HF_R e HF_C) (Figura 5a) e FS (FS_R e FS_C) (Figura 5b), respectivamente. Os coeficientes de variação das médias de P_{mac} nas camadas avaliadas foram classificados como médios, exceto nas camadas de 0,40-0,60 m de HF_C , sendo classificado como baixo. Como já observado para Ds e RP, em todas as situações houve redução gradativa da variação dos dados com o aumento da profundidade.

De modo geral, não foram constatadas diferenças significativas para as médias de P_{mac} entre as camadas nas áreas de renovação do plantio, tanto para HF_R100 e HF_R0 (Figura 5a) quanto FS_R0 e FS_R100 (Figura 5b). Porém, os valores de P_{mac} nas diferentes camadas indicou que a maior presença de resíduos sobre a superfície teve efeito negativo direto e/ou indireto sobre a homogeneidade das condições físicas no perfil do solo, pois as médias estiveram mais distantes entre si quando há a manutenção total dos resíduos. Desse modo, em FS_R100 a média de P_{mac} na camada 0-0,10 m foi significativamente maior (43 %) em relação à camada 0,40-

0,60 m, indicando que o preparo não aumentou a P_{mac} no perfil até a profundidade de trabalho, conforme foi verificado na condição sem resíduo (FS_{R0}).

Nas áreas sob condução do plantio, onde não houve preparo de solo (HF_C e FS_C), a heterogeneidade da P_{mac} no perfil foi indicativa dos impactos do tráfego na colheita sobre a estrutura do solo, principalmente em superfície. Em áreas não trafegadas é comum o decréscimo da P_{mac} com o aumento da profundidade, sendo essa situação invertida após o tráfego de máquinas, indicando maior susceptibilidade das camadas superficiais aos impactos do tráfego sobre a P_{mac} (LOPES et al., 2015).

As médias de P_{mac} das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m ($0,13 \pm 0,02$ e $0,14 \pm 0,02$ $m^3 m^{-3}$, respectivamente) em HF_C foram significativamente menores em relação às camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m ($0,17 \pm 0,01$ e $0,22 \pm 0,01$ $m^3 m^{-3}$, respectivamente). Já a média da camada de 0,40-0,60 m foi significativamente maior em relação às camadas superiores (Figura 5a). Nesse tratamento não foram observados valores de P_{mac} abaixo do valor mínimo considerado crítico para o crescimento radicular da maioria das espécies ($0,10$ $m^3 m^{-3}$) (LIPIEC; HATANO, 2003). De maneira similar ao HF_C , em FS_C , a média de P_{mac} na camada 0,40-0,60 m ($0,13 \pm 0,01$ $m^3 m^{-3}$) foi significativamente maior em relação às demais camadas avaliadas. Já as médias nas camadas 0-0,10 e 0,20-0,40 m foram estatisticamente semelhantes, porém, a média na camada 0,10-0,20 m ($0,04 \pm 0,01$ $m^3 m^{-3}$) foi significativamente menor em relação às demais camadas (Figura 5b). Ressalta-se que nessa situação, a P_{mac} esteve consideravelmente abaixo do valor considerado crítico de $0,10$ $m^3 m^{-3}$ (LIPIEC; HATANO, 2003). Esses resultados estão em consonância com o observado para D_s , em que as menores quantidades de resíduos sobre o solo podem também ter contribuído com a maior redução da macroporosidade.

As alterações na P_{mac} também indicaram que a maior presença de resíduos em HF influenciou negativamente os resultados do preparo de solo realizado em seguida, visto que, com exceção da camada 0-0,10 m, as médias de P_{mac} das três camadas subjacentes foram menores em HF_{R100} ($0,09 \pm 0,01$ $m^3 m^{-3}$) em relação a HF_{R0} ($0,14 \pm 0,02$ $m^3 m^{-3}$) e HF_C ($0,17 \pm 0,01$ $m^3 m^{-3}$) (Figura 5a). As médias de P_{mac} no perfil (0-0,60 m) desses tratamentos foram de 0,10; 0,15 e 0,16 $m^3 m^{-3}$, respectivamente para HF_{R100} , HF_{R0} e HF_C (Figura 5a).

De outro modo, na área FS, onde há menor presença de resíduo comparativamente a HF, as médias de P_{mac} das três primeiras camadas avaliadas em FS_{R100} e FS_{R0} foram estatisticamente semelhantes. Nesse caso, apenas a camada de

0,50 m de FS_{R0} ($0,15 \pm 0,02 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) apresentou médias de P_{mac} significativamente maiores em relação à respectiva camada de FS_{R100} ($0,11 \pm 0,01 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) (Figura 5b). Por sua vez, em FS_C, as médias de P_{mac} das camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foram significativamente menores em relação às respectivas camadas em FS_{R100} e FS_{R0}. As médias de P_{mac} no perfil (0-0,60 m) foram de 0,13, 0,14 e $0,08 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, para os tratamentos FS_{R100}, FS_{R0} e FS_C, respectivamente (Figura 5b). No caso de FS_C, o valor de $0,08 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ pode ser indicativo da necessidade de práticas de mitigação, dado que a difusão de gases no solo é limitada quando a macroporosidade é menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, prejudicando de sobremodo o crescimento radicular das plantas de eucalipto (LIPIEC; HATANO, 2003; SCHJØNNING et al., 2003).

Quanto ao volume total de poros (P_{tot}), os tratamentos avaliados apresentaram médias de 0,51 e $0,50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ em HF (Figura 5e) e FS (Figura 5f), respectivamente. Os coeficientes de variação nos dois sistemas de colheita foram classificados como baixos em todas as camadas avaliadas. Nas áreas de renovação do plantio (HF_R e FS_R), em grande parte dos casos, não foram constatadas diferenças significativas entre as médias de P_{tot} das camadas avaliadas. De forma semelhante a P_{mac} , os padrões mais uniformes de P_{tot} no perfil foram observados quando houve a remoção total do resíduo em ambos os sistemas de colheita (HF_{R0} e FS_{R0}).

Da mesma forma, na condução do plantio (HF_C e FS_C) o comportamento da P_{tot} no perfil acompanhou o que foi observado para P_{mac} . Dessa forma, em HF_C, a maior média de P_{tot} também foi observada na última camada (Figura 5e) e, em FS_C, a média de P_{tot} da camada 0,10-0,20 m ($0,40 \pm 0,01 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) foi significativamente menor em relação às médias das demais camadas ($0,47 \pm 0,01 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), como observado para P_{mac} (Figura 5f). A semelhança entre o comportamento dessas variáveis no perfil indica que a porosidade total é, de fato, mais afetada pelas mudanças na macroporosidade que a microporosidade (AMPOORTER et al., 2007).

De maneira geral, as camadas avaliadas apresentaram $P_{\text{tot}} \geq 0,50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Desse modo, apenas as camadas 0-0,10-0,20 e 0,20-0,40 m de HF_{R100} (Figura 5e) e as camadas 0,05, 0,15 e 0,30 m FS_C (Figura 5f), apresentaram $P_{\text{tot}} < 0,50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Os valores relativamente altos de P_{tot} são característicos do tipo de solo da área, no caso Latossolo Vermelho distrófico, e que possui textura média argilosa e mineralogia oxidica, fatores esses associados a formação de microagregados que favorecem o aumento da porosidade total (BRONICK; LAL, 2005). Contudo, altos valores de P_{tot} podem não representar boas condições físicas, visto que os fluxos de gases e água no

solo dependem fortemente do tamanho, conectividade e continuidade dos poros (DEXTER, 2004).

O comportamento do volume de microporos (P_{mic}) nas várias situações foi pouco sensível às alterações na estrutura do solo promovidas pelo manejo, como também observado por Jesus et al. (2015). Dessa forma, a P_{mic} apresentou médias de 0,37 e 0,38 $m^3 m^{-3}$ em HF (Figura 5c) e FS (Figura 5d), respectivamente, com coeficientes de variação classificados como baixos nos dois sistemas e em todas às camadas avaliadas. De modo geral, as diferenças dos valores médios de P_{mic} entre camadas nos seus respectivos tratamentos foram sutis e na maioria das situações não significativas, sobretudo nos tratamentos com preparo de solo. Os valores médios também estiveram próximos quando comparados entre tratamentos, independentemente do sistema de colheita avaliado. Nesse sentido, os valores médios estiveram situados variaram de 0,33 a 0,40 $m^3 m^{-3}$.

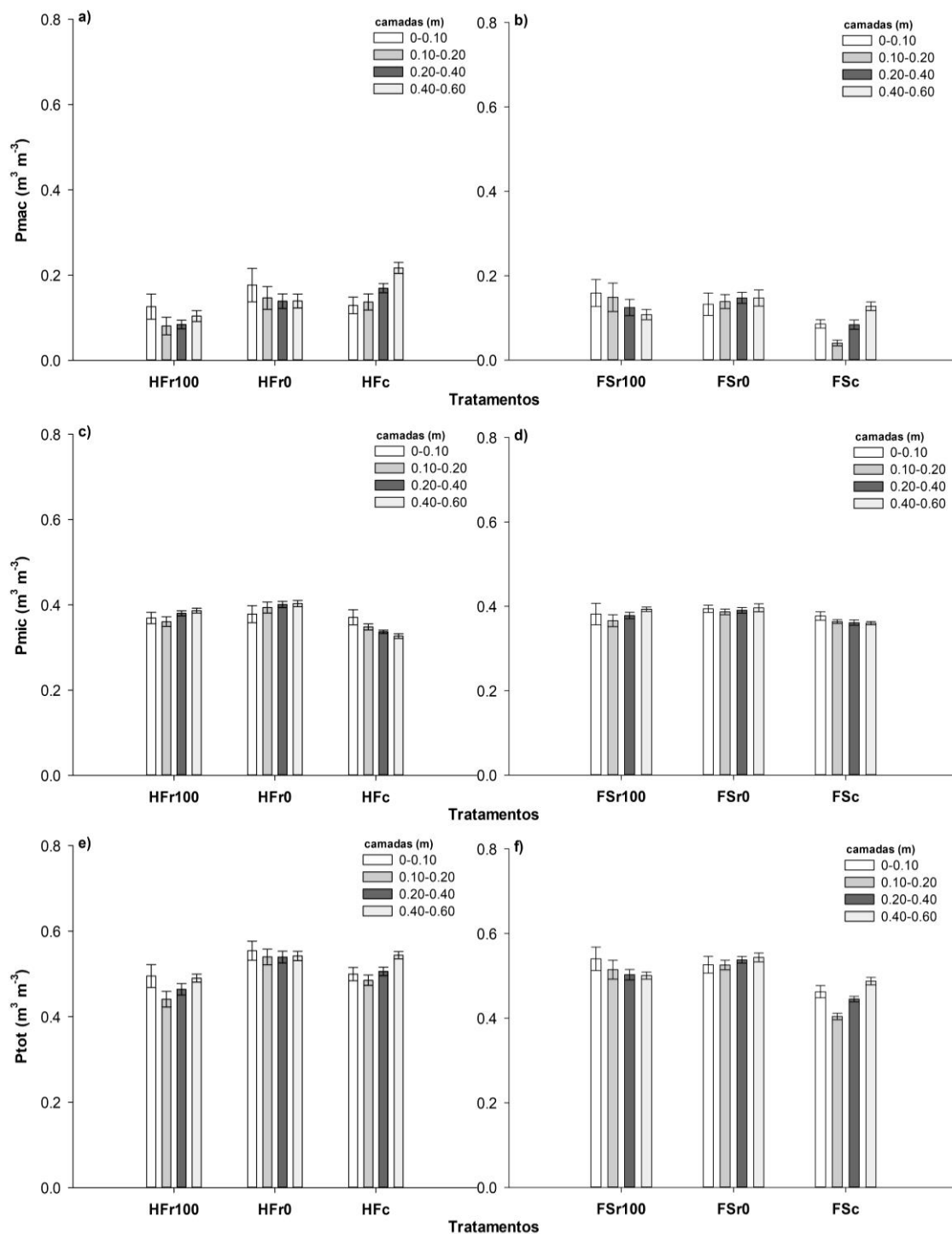


Figura 5. Médias de porosidade do solo; micro (P_{mic}), macro (P_{mac}) e total (P_{tot}) nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a), (c) e (e) harvester + forwarder (HF) e (b), (d) e (f) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Permeabilidade do solo ao ar

Os valores de permeabilidade do solo ao ar (K_a) apresentaram médias de 7,21 e 9,41 μm^2 , com valores mínimos de 0,04 e 0,06 μm^2 e máximos de 37,52 e 53,36

μm^2 , respectivamente para HF (Figura 6a) e FS (Figura 6b). Apesar de algumas camadas eventualmente apresentarem valores menores que $1 \mu\text{m}^2$, em nenhuma das situações avaliadas os valores médios de K_a estiveram abaixo do considerado crítico para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, no caso $K_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002). Os coeficientes de variação das médias de K_a nas camadas avaliadas foram classificados como alto e, dentre outros fatores, a alta variabilidade pode ser resultante da grande variação estrutural que o sistema poroso do solo pode apresentar mesmo à curtas distâncias entre pontos de amostragem (BRONICK; LAL, 2005).

Independente do sistema de colheita envolvido e da presença ou ausência de preparo de solo, não foram constatadas diferenças significativas para as médias de K_a entre as camadas avaliadas (Figuras 6a e 6b). Apesar da não significância estatística, pode-se associar os maiores valores de K_a na camada superficial, como observado para P_{mac} , ao aumento da porosidade de aeração nas camadas superficiais em decorrência do preparo de solo (TORMENA et al., 2002). Destaca-se que FS_{R0} apresentou maior uniformidade de K_a no perfil do solo, indicando que a remoção total do resíduo antes do preparo de solo contribuiu para uma maior uniformidade no perfil.

Por outro lado, nas áreas de condução do plantio, a K_a apresentou comportamento inverso no perfil, ou seja, houve diminuição em superfície em HF_{C} (Figura 6a) e FS_{C} (Figura 6b), o que pode estar relacionado aos efeitos negativos do tráfego sobre a porosidade de aeração, independentemente da quantidade de resíduos sobre o solo. A semelhança entre o comportamento de K_a e o observado para as D_s , RP e P_{mac} , corrobora a hipótese considerada, visto que para as variáveis citadas a diferença estatística foi constatada em algumas situações. O aumento da K_a nas camadas subsuperficiais deve-se provavelmente à ação do sistema radicular na ampliação da rede de poros em profundidade. A ação das raízes na porosidade pode ser também associada ao aumento da atividade da mesofauna. A mesofauna atua na formação de bioporos com maior continuidade e conectividade, promovendo aumentos nos fluxos de água e ar ao longo do perfil do solo (STRUDLEY; GREEN; ASCOUGH, 2008b). Além disso, a ausência de revolvimento do solo permitiu que os efeitos da estrutura sobre a K_a na camada subsuperficial fossem melhor evidenciados.

Os tratamentos HF_{R100} , HF_{R0} e HF_{C} apresentaram médias de K_a no perfil do solo (0,60 m) de 8,18, 6,77 e 6,66 μm^2 , respectivamente (Figura 6a), enquanto para

FS_R100, FS_R0 e FS_C, as médias foram de 5,12; 13,54 e 9,57 μm^{-2} , respectivamente (Figura 6b). Não foram constatadas diferenças significativas de K_a entre nas camadas nas mesmas profundidades para as diferentes situações estudadas. Porém, em ambos sistemas de colheita, as médias de K_a estiveram mais próximas entre si nas áreas de renovação do plantio, onde houve preparo de solo, quando comparadas com as camadas nas mesmas profundidades das áreas de condução do plantio, sobretudo nas camadas superficiais (Figuras 6a e 6b). Nesse sentido, as médias de K_a em 0-0,30 m de HF_R e FS_R foram 50,64% maiores em relação às médias das respectivas camadas em HF_C e FS_C, enquanto na camada 0,30-0,60 m a diferença foi de 15,55% a menos. Apesar da sobreposição de intervalos de confiança, a relativa distância entre os valores médios é um indicativo que a porosidade de aeração nas áreas sem preparo de solo efetivamente tende a ser menor em superfície e maior em subsuperfície.

É importante considerar que a amostragem das áreas ocorreu cerca de 240 e 120 dias após a colheita e preparo de solo, respectivamente e, os efeitos das práticas de manejo sobre a porosidade de aeração tendem a ser mais evidentes nos primeiros dias após as operações. A médio e longo prazos, é esperada a reconsolidação da estrutura do solo, sobretudo em sistemas florestais, potencialmente mais resilientes em relação aos sistemas agrícolas (ROCHA et al., 2015). O aumento da variabilidade induzida pelas operações mecanizadas pode ter ofuscado os efeitos do manejo sobre a medida da permeabilidade ao ar, dificultando a detecção de diferenças estatisticamente significativas.

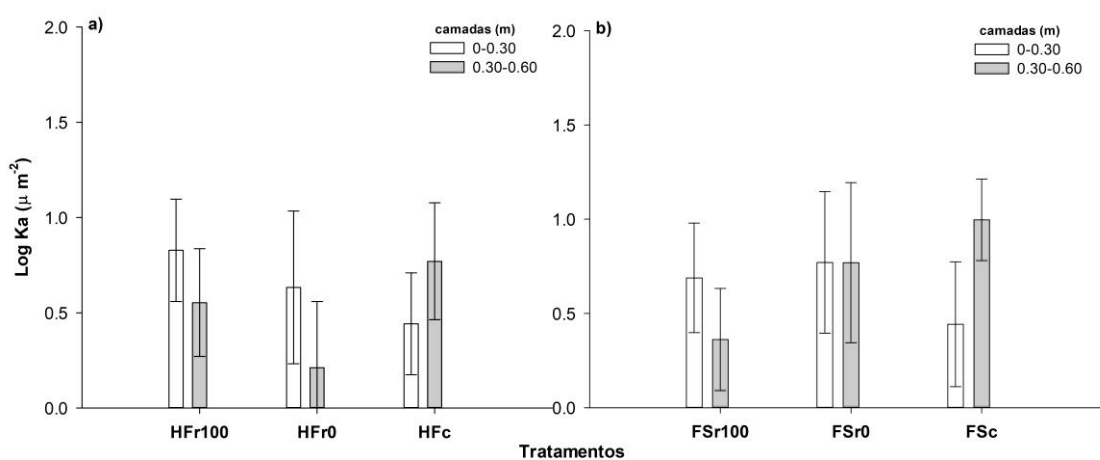


Figura 6. Médias de permeabilidade do solo ao ar (K_a) nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester +

forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Condutividade hidráulica em solo saturado

As médias da condutividade hidráulica (K_s) foram de 6,16 e 7,45 cm h^{-1} , com valores mínimos de 0,07 e 0,04 cm h^{-1} e máximos de 65,23 e 58,92 cm h^{-1} , respectivamente para HF (Figura 7a) e FS (Figura 7b). Como observado para K_a , em todas as situações, as médias de K_s apresentaram coeficientes de variação altos. A água e o ar compartilham o mesmo espaço no solo, portanto, espera-se, comportamento semelhante como resposta à variação natural do espaço poroso ocupado eventualmente por água ou ar.

O preparo de solo não resultou em condições de K_s significativamente diferentes entre as camadas de HF_R e FS_R , independentemente do nível de resíduo. A relativa distância entre as médias das camadas indicou que a maior uniformidade de K_s no perfil do solo foi observada em HF_R100 (Figura 7a), o que é contraditório pois é a condição de menor uniformidade no perfil quando consideram-se as demais variáveis avaliadas. A possível explicação para a resposta inversa de K_s pode estar associada aos efeitos da maior presença de resíduos sobre a superfície, ou seja, o revolvimento menos efetivo na superfície pode ter deixado a K_s da camada superficial em condição semelhante à camada subsuperficial que, por sua vez, encontrou-se sob menor alcance do manejo.

Nas áreas com remoção total de resíduos, HF_R0 e FS_R0 , o preparo de solo resultou em condições de K_s mais heterogêneas em profundidade (Figuras 7a e 7b). Esses resultados podem estar relacionados com a diminuição da continuidade e conectividade de poros na camada superficial, resultantes da maior efetividade do revolvimento ocasionado pelo preparo de solo, e consequente ausência de resíduos sobre a superfície. Apesar do preparo de solo, executado na ausência de resíduos, ter aumentado a uniformidade da D_s , RP e P_{mac} , o mesmo teve efeito contrário sobre a K_s . O revolvimento do solo tende a diminuir a continuidade e conectividade de poros, sendo essas características do sistema poroso diretamente responsáveis pelo aumento ou redução da K_s do solo (STRUDLEY; GREEN; ASCOUGH, 2008b).

Quando não houve o preparo de solo, por sua vez, o comportamento da K_s no perfil evidenciou a susceptibilidade da camada superficial aos efeitos do tráfego na colheita. A média de K_s da camada 0-0,30 m (1,33 cm h^{-1}) em FS_C foi

significativamente menor em relação à 0,30-0,60 m ($6,34 \text{ cm h}^{-1}$) (Figura 7b), o que não ocorreu com HF_C . Não só o revolvimento, mas também a compactação causada pelo tráfego pode diminuir a K_s nas camadas superficiais em relação a subsuperfície, afetando negativamente sua uniformidade no perfil. Em solos compactados, a redução da condutividade hidráulica ocorre com a diminuição da macroporosidade, a qual é funcional na drenagem da água no solo (AMPOORTER et al., 2007).

De modo geral, a medida da K_s foi pouco sensível em detectar diferenças significativas entre os tratamentos nas áreas com preparo de solo. As áreas HF_R100 e HF_R0 apresentaram médias de K_s no perfil do solo (0-0,60 m) de $5,73$ e $7,68 \text{ cm h}^{-1}$, enquanto em FS_R100 e FS_R0 estas foram de $3,63$ e $16,75 \text{ cm h}^{-1}$, em ambos os casos consideradas baixas e altas, respectivamente (Figura 7a e 7b). Apesar da ausência de diferenças significativas, a classificação obtida indica que o preparo de solo em áreas com remoção total dos resíduos tende a resultar em perfis com K_s mais elevada. Nesse caso, o aumento da macroporosidade juntamente com a homogeneização dessa condição no perfil, possivelmente sobrepôs à redução da continuidade e conectividade de poros eventualmente ocasionada pelo revolvimento do solo.

As áreas HF_C e FS_C apresentaram baixa K_s , com médias no perfil do solo (0-0,60 m) de $5,09$ e $4,08 \text{ cm h}^{-1}$, respectivamente (Figuras 7a e 7b). Nessa situação, o comportamento da variável indicou que o sistema de colheita adotado teve efeito significativo sobre o nível de degradação da estrutura do solo o que também pode ser associado à quantidade de resíduos sobre a superfície. A camada superficial (0-0,30m) de FS_C (Figura 7b) apresentou menores K_s em relação a HF_C (Figura 7a), o que também é observado em trabalhos semelhantes (JESUS et al., 2015). Tal informação pode ser associada ao estado degradado da estrutura do solo em FS_C , o que deve ser aliada aos demais indicadores já descritos.

Percebe-se que o manejo florestal mecanizado pode ter efeitos significativos sobre a dinâmica do ar e da água no solo, seja através do aumento da compactação resultante do tráfego na colheita ou pelo revolvimento de camadas promovido pelo preparo do solo. Porém, em determinadas situações, as fontes de variabilidade espacial e temporal sobrecarregam os efeitos do manejo sobre as características do sistema poroso do solo, como por exemplo, a K_s e K_a , o que pode ter mascarado os efeitos específicos das diferentes práticas de manejo avaliadas.

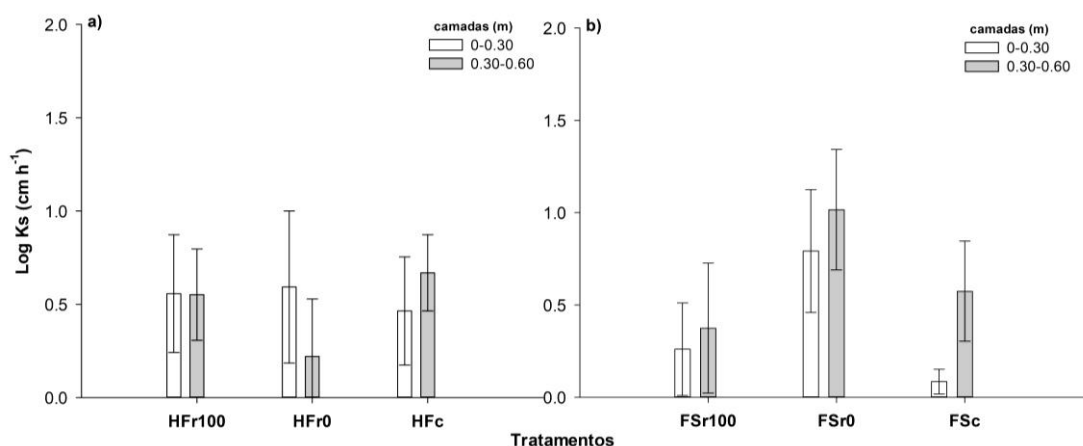


Figura 7. Médias condutividade hidráulica em solo saturado (K_s) nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Pressão de pré-consolidação e grau de compactação do solo

Os valores de pré-consolidação (σ_p) apresentaram médias de 125,45 e 163,82 kPa, com valores mínimos de 29,45 e 29,58 kPa e máximos de 411,10 e 616,36 kPa, respectivamente para HF (Figura 8a) e FS (Figura 8b). Em todas as situações avaliadas as médias de pressão de pré-consolidação (σ_p) apresentaram intervalos de confiança de elevada amplitude (Figura 8ab). A elevada amplitude da σ_p reflete o manejo empregado na área, visto que, no caso desse estudo, o tráfego de máquinas recente e passado certamente foi bastante aleatório (GONTIJO et al., 2007), podendo ser associado a fatores intrínsecos relacionados ao comportamento compressivo do solo nessas condições. O histórico de tensões experimentadas pelo solo, densidade inicial do solo, teores de matéria orgânica e conteúdo de água são alguns dos fatores que podem ter contribuído efetivamente para a elevada variabilidade observada para a σ_p (BYGDÉN; ELIASSON; WÄSTERLUND, 2003; DEXTER, 2004).

Os maquinários utilizados na colheita florestal aplicam pressões acima de 50 kPa (DIAS JUNIOR et al., 2005), o que significa que o tráfego realizado na condição de umidade próxima à capacidade campo pode resultar em compactação adicional nos pontos onde a σ_p foi mínima. A umidade do solo é quem mais controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer quando o solo é submetido ao tráfego (DIAS JÚNIOR, 1994), considerando-se que os demais fatores edáficos sejam semelhantes, como é o caso das áreas do estudo. A umidade do solo no momento da

colheita deve ser monitorada, pois com o solo mais seco, a capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para resistir às pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (RICHART et al., 2005).

Nas áreas avaliadas, as condições de σ_p foram estatisticamente semelhantes entre camadas independentemente do tipo de manejo adotado. Contudo, quando houve o preparo de solo (HF_R e FS_R), os valores médios entre camadas foram mais distantes em relação àqueles sem preparo (HF_C e FS_C). Desse modo, o preparo de solo (HF_R e FS_R), qualquer que seja a quantidade de resíduos, a σ_p da camada 0,15 m foi 39,47 e 50,17% acima da média da camada 0-0,30-0,60 m. Nos tratamentos sem preparo de solo (HF_C e FS_C) essas diferenças foram de 25,93 e 8,68% (Figura 8a e 8b), respectivamente. Tal comportamento é justificável, uma vez que o preparo de solo promove revolvimento das camadas e conseqüentemente ocorre deposição diferencial de partículas, influenciando o comportamento da σ_p no perfil (DIAS JUNIOR et al., 2005).

A similaridade estatística do comportamento da σ_p entre os tratamentos que compõem HF e FS (Figura 8a e 8b) pode estar associada ao histórico de uso das áreas, uma vez que σ_p é fortemente afetada pelo histórico de pressões sofridas pelo solo ao longo do tempo de uso (BYGDÉN; ELIASSON; WÄSTERLUND, 2003). Deve-se considerar que as práticas de manejo adotadas nos ciclos de cultivo anteriormente conduzidos nesse talhão eram realizadas de maneira relativamente homogênea na área. Portanto, as áreas onde atualmente estão alocados os tratamentos guardam um histórico de uso semelhante, ou seja, o histórico de pressões aplicadas sobre o solo nessas áreas é semelhante e possivelmente contribuiu para que o efeito do atual manejo sobre a σ_p não tenha sido evidenciado, no curto prazo.

Outra observação importante é que há uma determinada homogeneidade edáfica no talhão. Neste sentido, os fatores que podem influenciar o comportamento compressivo do solo, tais como: declividade, granulometria (Tabela 2), matéria orgânica (Tabela 1) e mineralogia, de modo geral, apresentam poucas variações. Dentre os fatores citados, espera-se que a médio e longo prazo as práticas do manejo atual tenham efeito significativo sobre os teores de matéria orgânica, pois as mesmas envolvem a remoção ou permanência do resíduo orgânico das áreas. É importante que, nas renovações subseqüentes, seja feito o monitoramento da σ_p como forma de avaliar os possíveis benefícios da permanência do resíduo sobre o comportamento compressivo do solo (RICHART et al., 2005).

Nas áreas de renovação do plantio (HF_R e FS_R), o grau de compactação (GC) foi de 68,80 e 69,96 %, com valores mínimos de 51,29 e 58,90 % e máximos de 84,44 e 82,39 %, HF (Figura 9a) e FS (Figura 9b), respectivamente. Nessa situação, os valores máximos foram observados na camada superficial (0-0,30m) quando houve manutenção de resíduos antes do preparo de solo, em ambos sistemas de colheita (HF_{R100} e FS_{R100}). Apesar da ausência de diferenças significativas entre médias, esses resultados indicam que presença do resíduo prejudicou o preparo de solo, resultando eventualmente em GC mais elevado, sobretudo nos primeiros 0,30 m do perfil do solo.

Quando os plantios são conduzidos e não há preparo do solo (HF_C e FS_C), o GC foi de 70,11 e 78,46 %, com valores mínimos de 62,83 e 68,47 % e máximos de 82,18 e 83,66 %, respectivamente em HF_C (Figura 9a) e FS_C (Figura 9b), respectivamente. Nesse caso, o GC de FS_C foi significativamente maior em relação a HF_C . Dessa forma, como as demais variáveis analisadas, a ausência de resíduos sobre o solo no momento da colheita pode ter contribuído para os resultados observados. Contudo, as restrições ao desenvolvimento radicular das culturas ocorre em valores de $GC > 85 \%$ (HÅKANSSON, 1990; OLIVEIRA et al., 2010; SUZUKI et al., 2007).

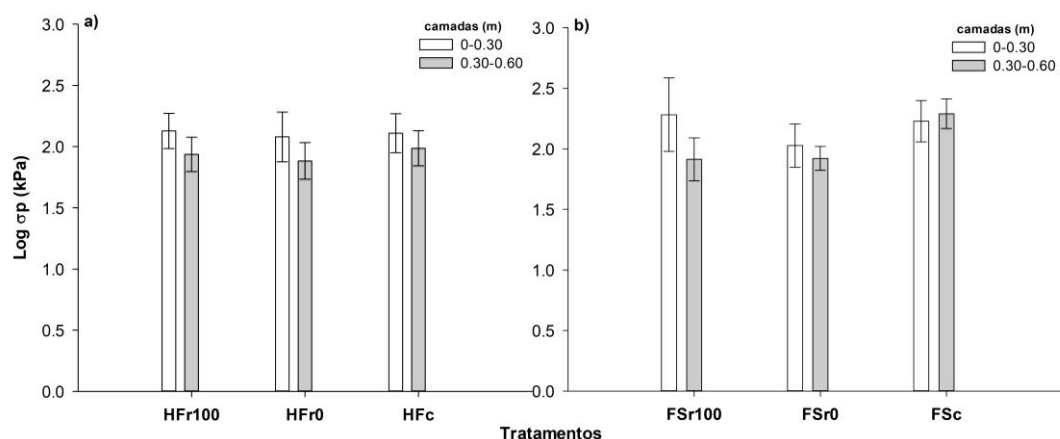


Figura 8. Médias de pressão de pré-consolidação (σ_p) nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

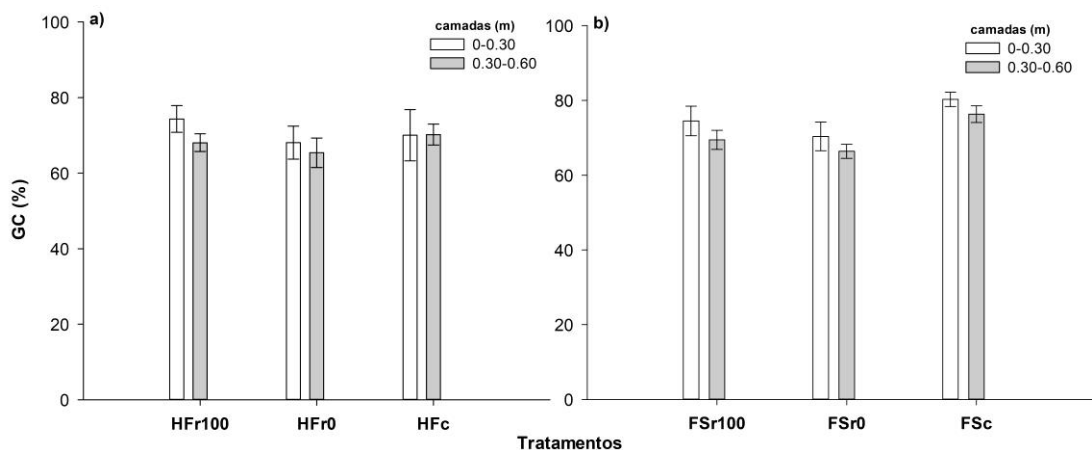


Figura 9. Médias de grau de compactação do solo (GC) nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a) harvester + forwarder (HF) e (b) feller + skidder (FS). Intervalos de confiança para médias ao nível de 10% de significância.

Análise das correlações entre variáveis físicas

As correlações lineares entre as variáveis Ds e RP, bem como entre Ds e P_{mac} , foram negativas e significativas ($p < 0,05$) (Figura 10), indicando que as alterações na densidade do solo promovidas pelos diferentes sistemas de manejo mecanizado, implicam em alterações na RP e P_{mac} . Essas duas últimas variáveis também apresentaram coeficientes de correlação linear (r) classificados como forte, o que indica a elevada capacidade do modelo linear ajustado em estimar as alterações na P_{mac} e RP em função das mudanças na densidade (Figura 12 e 13). Também, os coeficientes de correlação não-linear (RDC) entre as variáveis foram significativos ($p < 0,05$) e mostraram-se ligeiramente maiores em relação ao r (Figura 11).

Considerando o valor de $RP \geq 3$ MPa como limite crítico para o desenvolvimento radicular do eucalipto (SINNETT et al., 2008), esse valor correspondeu a uma Ds de 1,77; 1,66; 1,66 e 1,60 $kg\ dm^{-3}$, respectivamente em HFr100, HFc, FSr100 e FSc (Figura 12a, 12c, 12d e 12f) e 1,47 e 1,46 $kg\ dm^{-3}$, respectivamente em HFr0 e FSr0 (Figura 12b, 12e). Portanto, nas áreas onde o preparo de solo foi prejudicado pelo maior volume de resíduos (HFr100 e FSr100) ou onde não houve preparo (HFc e FSc), independente do sistema de colheita, quando o limite crítico de RP (≥ 3 MPa) é atingido, a Ds também atinge o seu limite considerado crítico para o desenvolvimento do eucalipto ($\geq 1,60\ kg\ dm^{-3}$) (DEDECEK; GAVA, 2005). Porém, nas áreas onde o preparo de solo foi mais efetivo devido a ausência total de resíduos (HFr0 e FSr0), mesmo quando a RP

atinge o limite crítico (≥ 3 MPa), a D_s ainda se mantém em valores abaixo do limite crítico ($< 1,60 \text{ kg dm}^{-3}$).

Ao considerar uma P_{mac} mínima de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ como limitante para o desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto (LIPIEC; HATANO, 2003; SCHJØNNING et al., 2003), esses valores corresponderam a uma D_s de 1,36; 1,31 e $1,43 \text{ kg dm}^{-3}$ em HF (Figura 13a, 13b e 13c) e 1,36, 1,30 e $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ em FS (Figura 13d, 13e e 13f), respectivamente. Esse resultado é indicativo que mesmo em valores de D_s abaixo do limite crítico ($\geq 1,60 \text{ kg dm}^{-3}$), a P_{mac} limitante pode ser atingida, independente do sistema de manejo adotado. Contudo, nas áreas de renovação do plantio, observou-se maior frequência de pontos abaixo de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ no tratamento com maior volume de resíduo ($\text{HF}_{\text{R}100}$), sobretudo na camada 0,10-0,20 m (Figura 12a). Já nas áreas de condução do plantio, a maior concentração de pontos abaixo de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ foi observada quando o volume de resíduos sobre a superfície foi menor (FS_{C}), sobretudo os pontos referentes à camada 0,10-0,20 m (Figura 12f).

Também foram observadas correlações lineares positivas e significativas entre P_{mac} e P_{tot} , em todos os tratamentos avaliados (Figura 10). No entanto, na maioria das situações, as correlações lineares entre P_{mic} e P_{tot} foram não significativas e os coeficientes dessas correlações foram classificados como fracos (Figura 10). Esse resultado é indicativo que as alterações na P_{tot} estão mais relacionadas a P_{mac} do que a P_{mic} . A fragmentação de agregados resultante do preparo de solo e que promove aumentos da porosidade, bem como, a compactação do solo resultante do tráfego de máquinas e que promove redução da porosidade, provocam mais alterações no volume de macroporos em relação ao de microporos (TORMENA et al., 2002).

Em análise conjunta, o comportamento geral das variáveis físicas avaliadas no estudo sinalizou que os mecanismos promotores de alterações na D_s tiveram maior influência sobre os indicadores: RP, P_{mac} , K_a , K_s e GC e, em algumas situações, essa observação foi comprovada estatisticamente. Dessa forma, o estado de qualidade física do solo na área experimental pode ser atribuído tanto aos efeitos cumulativos das práticas de manejo anteriores, quanto às diferentes práticas adotadas no manejo atual, mesmo que no curto prazo (Tabela 2).

Tabela 2. Influência do manejo florestal mecanizado sobre o comportamento geral das propriedades físicas no perfil de Latossolo Vermelho argilo-arenoso, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS)

Tratamentos ¹	HF _R 100	FS _R 100	HF _R 0	FS _R 0	HF _C	FS _C										
<i>Variável</i> ²							<i>Comportamento</i>									
Ds	1.40	1.29	1.21	1.24	1.30	1.46	■	■	—	—	—	■	■	■	■	■
RP	1.27	1.29	1.41	1.56	1.23	2.00	—	—	—	■	■	—	—	—	—	■
P_{mac}	0.10	0.13	0.15	0.14	0.16	0.08	—	■	■	■	■	■	■	■	—	—
P_{mic}	0.37	0.38	0.39	0.39	0.35	0.37	■	■	■	■	■	—	—	—	—	■
P_{tot}	0.47	0.51	0.54	0.53	0.51	0.45	—	■	■	■	■	■	■	■	—	—
θ_{cc}	0.34	0.37	0.38	0.38	0.32	0.35	—	■	■	■	■	—	—	—	—	■
K_a	8.05	4.96	7.02	13.70	6.85	9.81	—	—	—	■	■	—	—	—	—	■
K_s	5.69	3.33	8.03	15.75	5.14	3.83	—	—	—	■	■	—	—	—	—	—
σ_p	119.94	171.93	121.15	109.47	133.68	212.09	—	■	■	—	—	—	—	—	—	■
GC	70.34	71.73	66.75	68.53	70.11	78.46	■	■	—	—	—	■	■	■	■	■

⁽¹⁾ sistema de colheita harvester + forwarder (HF) e feller + skidder (FS). ⁽²⁾Ds: densidade do solo, em kg dm⁻¹; RP: resistência do solo à penetração, em MPa; P_{mac}, P_{mic} e P_{tot}: porosidade do solo macro, micro e total, respectivamente, em m³m⁻³; θ_{cc}: umidade do solo na capacidade de campo; K_a: permeabilidade ao ar, em μm²; K_s: condutividade hidráulica, em cm h⁻¹; σ_p: Pressão de pré-consolidação, em MPa; GC%: Grau de compactação, em %.

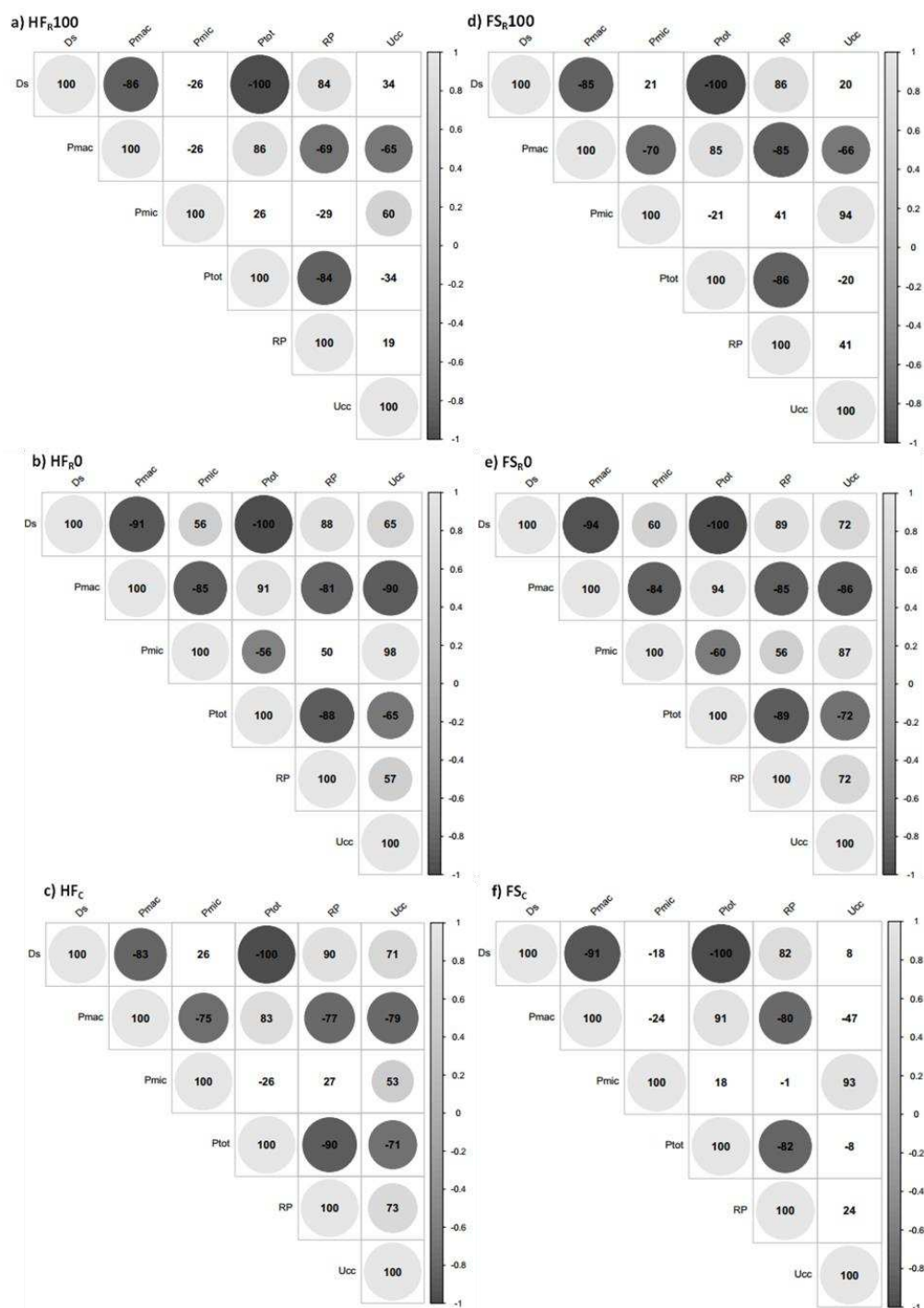


Figura 10. Coeficientes de correlação linear (r) entre algumas variáveis avaliadas (0-0,60 m), em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a), (b) e (c) harvester + forwarder (HF) e (d), (e) e (f) feller + skidder (FS). Os círculos coloridos indicam que houve significância ao nível de 0,05 e a escala de cores indica a força da correlação.

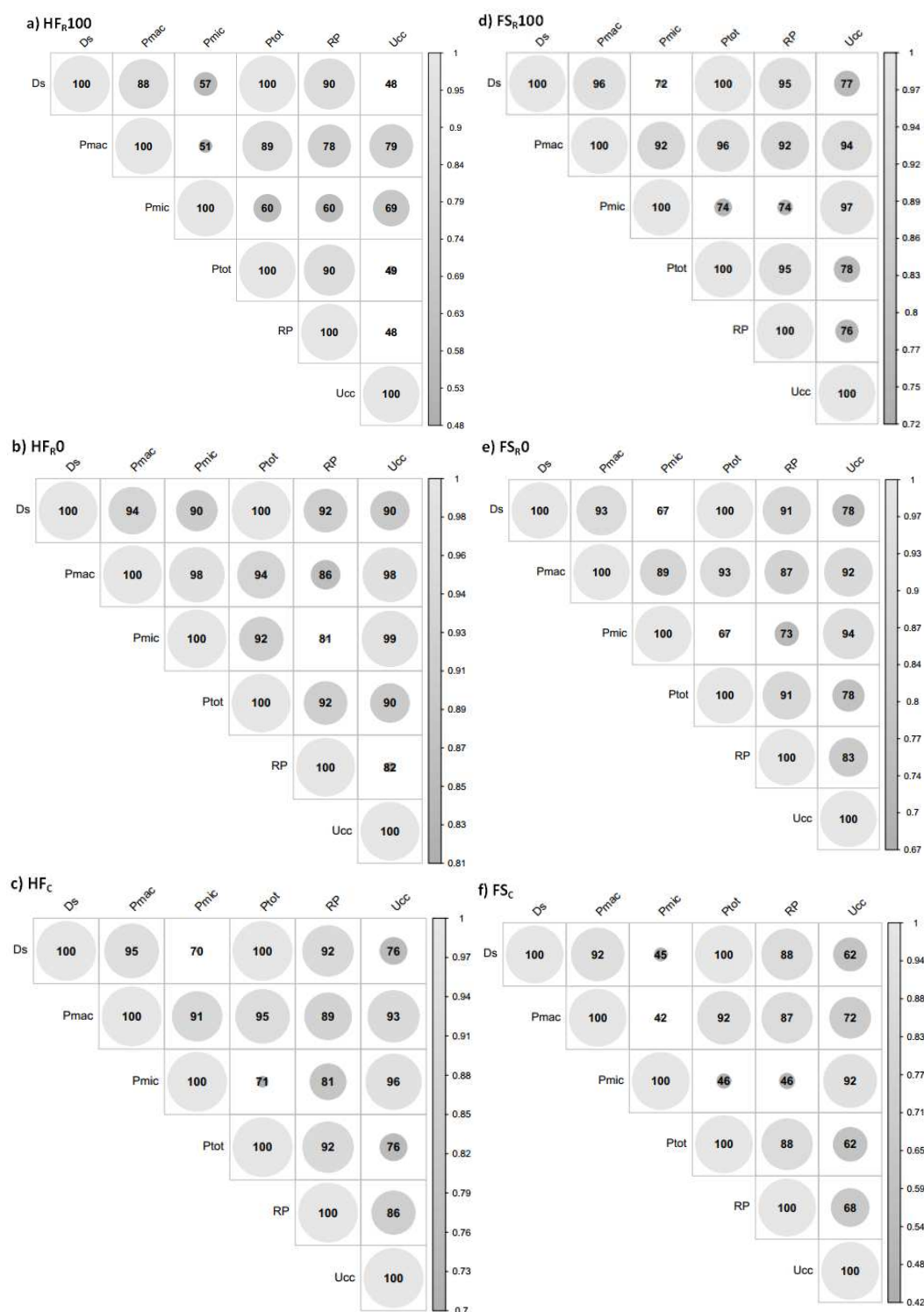


Figura 11. Coeficientes de correlações não-linear (RDC) entre algumas variáveis avaliadas (0-0,60 m), em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a), (b) e (c) harvester + forwarder (HF) e (d), (e) e (f) feller + skidder (FS). Os círculos coloridos indicam que houve significância ao nível de 0,05 e a escala de cores indica a força da correlação.

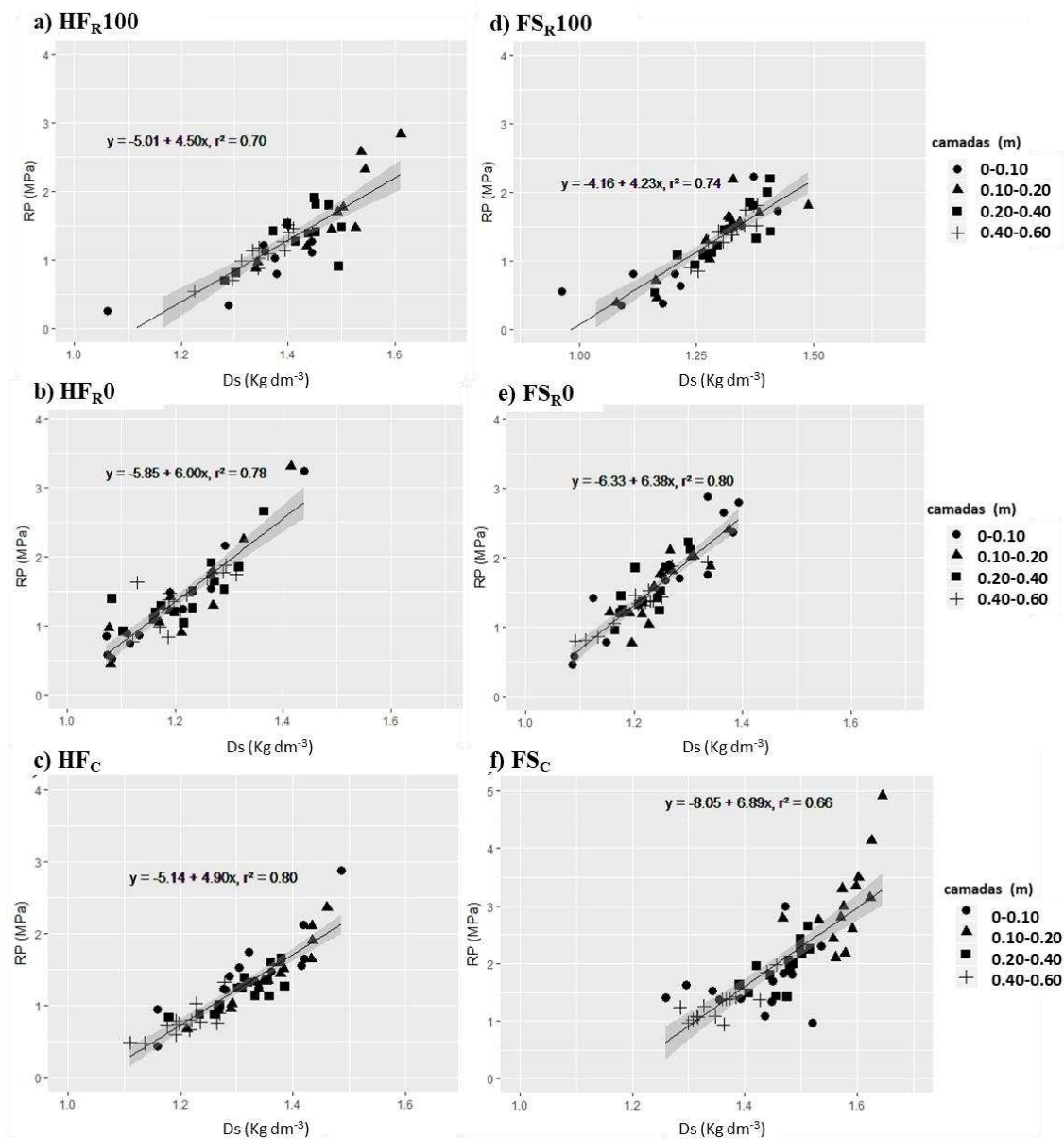


Figura 12. Resistência do solo à penetração (RP) em função da densidade do solo (Ds) em diferentes camadas avaliadas, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a), (b) e (c) harvester + forwarder (HF) e (d), (e) e (f) feller + skidder (FS).

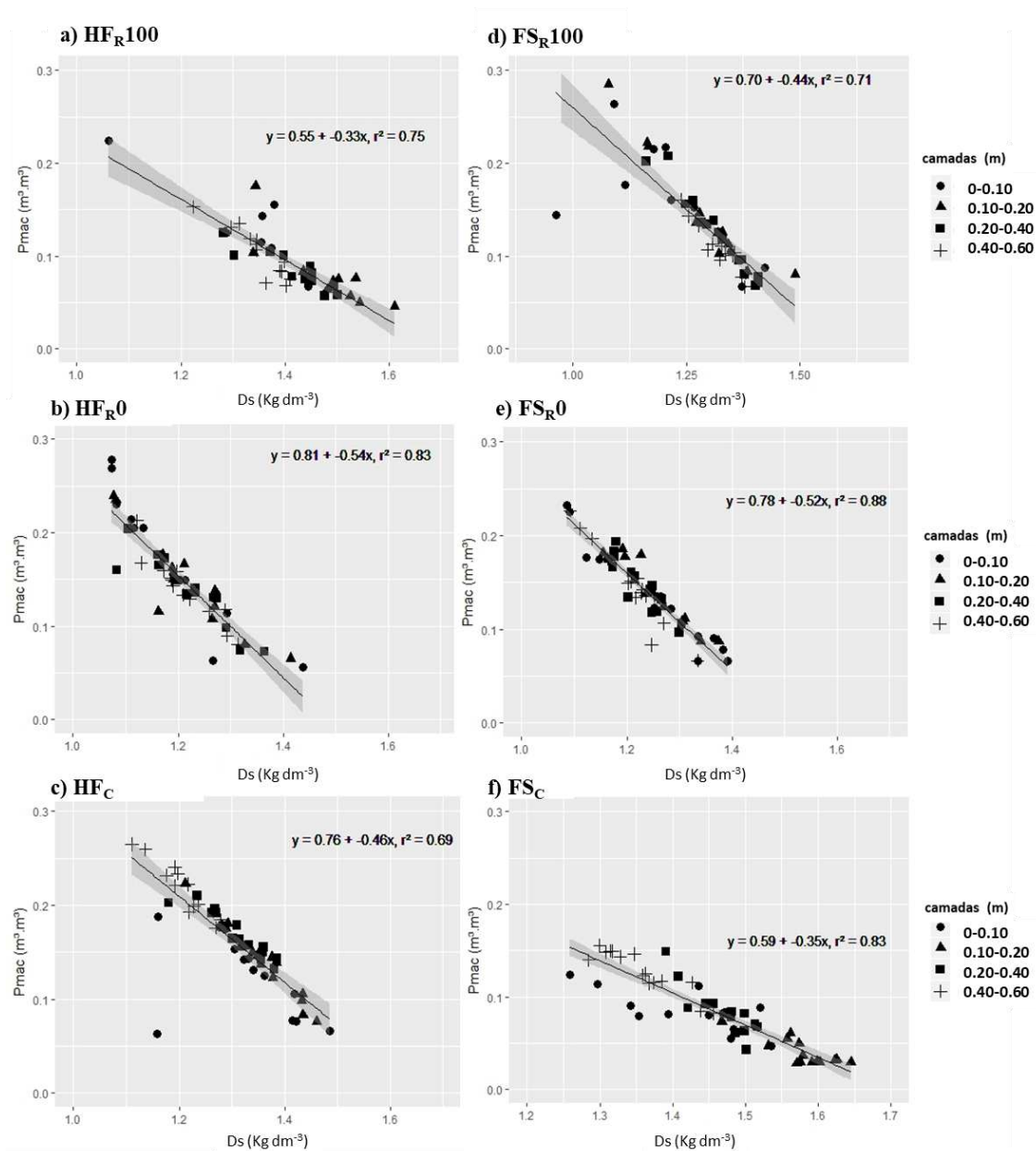


Figura 13. Macroporosidade (P_{mac}) em função da densidade do solo (D_s), em diferentes camadas avaliadas, em áreas renovadas (R) e com manejo de resíduos (100% e 0%) ou conduzidas (C), ambas precedidas de colheita de eucalipto com (a), (b) e (c) harvester + forwarder (HF) e (d), (e) e (f) feller + skidder (FS).

CONCLUSÕES

Nas áreas sob condução do plantio, o comportamento dos indicadores físicos avaliados indicou que a presença de resíduos sobre a superfície do solo pode atenuar os efeitos degradantes do tráfego na colheita sobre a estrutura do solo;

Em contrapartida, nas áreas de renovação do plantio, ficou evidente que o maior volume de resíduos sobre a superfície do solo prejudicou o resultado final da operação de preparo de solo. O preparo de solo foi favorecido e resultou em perfis de

solo com melhores condições físicas para o desenvolvimento radicular das plantas de eucalipto.

REFERÊNCIAS

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v. 73, n. 1–2, p. 145–160, 2003.

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

ANGHINONI, G. et al. Within cropping season changes in soil physical properties under no-till in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 108–112, 2017.

ARVIDSSON, J. et al. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 60, n. 1–2, p. 79–89, 2001.

BLACKWELL, P. S. et al. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterise macropore structure and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Jounall Soil Science**, v. 41, p. 215–228, 1990.

BORTOLAS, E. P.; STAHL, J.; MINATEL, R. Preparo de solo em áreas de reforma de Pinus e Eucalyptus com idade superior a 20 anos. **Anais da 45ª Reunião Técnico-Científica do PTSM , Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 93–98, 2013.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differendes in a coastal plain soil. **Soil Tillage & Research**, p. 205–217, 1997.

BYGDÉN, G.; ELIASSON, L.; WÄSTERLUND, I. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. **Journal of Terramechanics**, v. 40, n. 3, p. 179–190, 2003.

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

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

DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análises químicas do solo: metodologias**. Viçosa, MG, 1981.

DÉFOSSEZ, P. et al. Modelling the impact of declining soil organic carbon on soil compaction: Application to a cultivated Eutric Cambisol with massive straw exportation for energy production in Northern France. **Soil and Tillage Research**, v. 141, p. 44–54, 2014.

DEXTER, A R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004.

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

DIAS JÚNIOR, M. DE S. **Compression of Three Soils Under Long-term Tillage and Wheel Traffic**. 1994. 114p. Ph.D. Dissertation. Michigan State University.

EBELING, C.; LANG, F.; GAERTIG, T. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 74–82, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2017.

FERREIRA, P. A. **Drenagem de terras agrícolas**. 1999. 187p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa-UFV, Viçosa-MG.

FIGUEIREDO, G. C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 164p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz ESALQ/US, Piracicaba-SP.

FRIENDLY, M. Corrgrams: Exploratory displays for correlatigon matrices. **American Statistician**, v. 56, n. 4, p. 316–324, 2002.

GAERTIG, T. et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 159, n. 1–2, p. 15–25, 2002.

GEIST, J. M.; HAZARD, J. W.; SEIDEL, K. W. Assessing Physical Conditions of some Pacific Northwest Volcanic Ash Soils After Forest Harvest. **Soil Science Society of America**, v. 53, p. 946–950, 1989.

GONÇALVES, S. B. et al. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, p. 224–229, 2017.

GONTIJO, I. et al. Planejamento amostral da pressão de consolidação de um Latossolo Vermelho Distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 1245–1254, 2007.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, n. 2, p. 163–189, 1980.

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

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 105–120, 1 abr. 1990.

HATTORI, D. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 770–776, 2013.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: Instituto Agrônômico do Paraná**. Disponível em: <www.iapar.br>. Acesso em: 10 dez. 2017.

JESUS, G. L. DE et al. Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1190–1203, 2015.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 107–136, 2003.

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

LOPEZ-PAZ, D.; HENNIG, P.; SCHÖLKOPF, B. The Randomized Dependence Coefficient. **preprint arXiv**, v. 2, p. 1–9, 2013.

MARCHI, E. et al. Impact of silvicultural treatment and forest operation on soil and regeneration in Mediterranean Turkey oak (*Quercus cerris* L.) coppice with standards. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 475–484, 2016.

MCDONALD, T. P.; SEIXAS, F. Effect of slash on forwarder soil compaction. **Journal of Forest Engineering**, v. 8, n. 2, p. 15–26, 1997.

MCQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 63, n. 3–4, p. 93–107, 2002.

MENDES, L.; BELING, R. R.; TREICHEL, M. **Anuário Brasileiro da Silvicultura**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016.

MISRA, R. K.; GIBBONS, A. K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots , in relation to soil strength arising from compaction. **Plant & Soil**, v. 182, p. 11, 1996.

MORAES, M. T. DE et al. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1704–1713, 2012.

NAJAFI, A.; SOLGI, A.; SADEGHI, S. H. Soil disturbance following four wheel

rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 165–169, 2009.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 81, p. 914–920, 2010.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 5–6, p. 547–551, 2000.

PEARSON, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society**, n. 58, p. 240–242, 1895.

PINARD, M. A.; BARKER, M. G.; TAY, J. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v. 130, n. 1–3, p. 213–225, 2000.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, p. 30–48, 2003.

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: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49–134.

RIBEIRO, M. A. V. et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, n. 1, p. 1157–1164, 2010.

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

ROCHA, S. P. DA et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de eucalipto implantado em diferentes métodos de preparo do solo. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 108, p. 965–977, 2015.

SANDS, R.; GREACEN, E. L.; GERARD, C. J. Compaction of sandy soils in radiata pine forest I, a penetrometer study. **Australian Journal of Soil Research**, v. 17, n. Woods 1976, p. 101–113, 1979.

SCHJØNNING, P. et al. Linking Soil Microbial Activity to Water- and Air-Phase Contents and Diffusivities. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 1, p. 156, 2003.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA, E. D. DE; SOUZA, C. R. DE. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 53, p. 9–16, 1998.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SILVA, A. R. DA; LIMA, R. P. DE. Soilphysics: an R package to determine soil preconsolidation pressure. **Comput Geosci**, v. 84, p. 54–60, 2015.

SILVA, A. R. DA; LIMA, R. P. DE. Comparison of Methods for Determining Precompression Stress Based on Computational Simulation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 0, p. 1–10, 2016.

SILVA, R. B. DA; LANÇAS, K. P.; JUNIOR MASQUETTO, B. Consolidometer: electronic-pneumatic equipment to evaluate soil consolidation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 607–615, 2007.

SILVA, S. R.; DE BARROS, N. F.; BOAS, J. E. B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 5, p. 759–768, 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade À Compactação De Um Latossolo Vermelho-Escuro E De Um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 24, n. 2, p. 239–249, 2000.

SINNETT, D. et al. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 273–280, 2008.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo

Vermelho distrófico sob semadura direta. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 25, p. 699–707, 2001.

STRUDLEY, M. W.; GREEN, T. R.; ASCOUGH, J. C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 1, p. 4–48, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.

TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, , 2017. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>

TORMENA, C. A. et al. Soil Bulk Density, Porosity And Resistance To Root Penetration In An Oxisol Managed By Different Soil Tillage Systems. **Scientia Agricola**, v. 59. n4, p. 18, 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 573–581, 1998.

VAZ, C. M. P. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

WARRICK, A. W. Spatial variability. In: HILLEL, D. (Ed.). **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655–675.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses.**, v. 19, p. 1467 – 1476, 1988.

ZENNER, E. K.; BERGER, A. L. Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 10, p. 1785–1794, 2008.

ZOU, C. et al. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, v. 236, n. 1, p. 105–115, 2001.

CONCLUSÕES GERAIS

Nas áreas de renovação do plantio, o comportamento da RP medida no campo não foi sensível aos diferentes níveis de resíduos culturais sobre a superfície do solo, oriundos dos sistemas de colheita harvester + forwarder e feller + skidder. Contudo, o comportamento da D_s , P_{mac} , K_s e RP medida em laboratório, indicou que, em tais áreas, o maior volume de resíduos sobre a superfície do solo prejudicou o resultado final da operação de preparo de solo. Na ausência do resíduo, o preparo de solo foi favorecido e resultou em perfis de solo com melhores condições físicas para o desenvolvimento radicular das plantas de eucalipto.

A avaliação geoestatística nas áreas de renovação do plantio mostrou que o preparo de solo reduziu drasticamente a dependência espacial da RP média no campo, inviabilizando o uso das técnicas de mapeamento associadas ao método. O comportamento aleatório observado para RP permitiu que o número de amostras necessárias para a estimativa dessa variável fosse determinado através de técnicas da estatística clássica.

Nas áreas sob condução do plantio, as quantidades de resíduos sobre o solo em cada sistema de colheita, também pouco afetaram a RP medida no campo. Porém, o comportamento dos demais indicadores evidenciou que a presença de resíduos sobre a superfície do solo pode atenuar os efeitos degradantes do tráfego na colheita sobre a estrutura do solo.