

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COMPACTAÇÃO DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO COM
O TRÁFEGO DE UM TRATOR SKIDDER NO
ARRASTE DE *Pinus elliottii*.**

JOSÉ CARLOS PEZZONI FILHO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Ciência
Florestal.

BOTUCATU-SP
Janeiro – 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COMPACTAÇÃO DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO COM
O TRÁFEGO DE UM TRATOR SKIDDER
NO ARRASTE DE *Pinus elliottii*.**

JOSÉ CARLOS PEZZONI FILHO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Paulo Torres Fenner

Co-Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Ciência
Florestal.

BOTUCATU-SP
Janeiro – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P521c Pezzoni Filho, José Carlos, 1984-
Compactação de um Cambissolo Háplico com o tráfego de um trator Skidder no arraste de *Pinus elliottii* / José Carlos Pezzoni Filho. - Botucatu : [s.n.], 2011

viii, 89 f. : ils. color., gráfs., tabs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011

Orientador: Paulo Torres Fenner

Co-orientador: Kléber Pereira Lanças

Inclui bibliografia

1. Skidder. 2. Compactação. 3. Pinus. 4. Densificação e arraste. I. Fenner, Paulo Torres. II. Lanças, Kléber Pereira. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: COMPACTAÇÃO DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO COM O TRÁFEGO
DE UM TRATOR SKIDDER NO ARRASTE DE *Pinus elliottii***

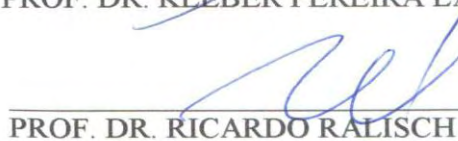
ALUNO: JOSÉ CARLOS PEZZONI FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO TORRES FENNER
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. KLÉBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. RICARDO RALISCH



PROFA. DRA. MARIA HELENA MORAES

Data da Realização: 31 de janeiro 2011.

“Tudo o que somos nasce com nossos pensamentos. Em nossos pensamentos, fazemos o nosso mundo”.

(Buda)

DEDICO

Aos meus pais, José Carlos Pezzoni e Maria Aparecida Vieira Santos Pezzoni.

OFEREÇO

À minha tia Elenice Martins Vieira dos Santos e a Madrinha Lucy Vieira dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, irmãos e parentes mais próximos, pelo apoio durante a realização do mestrado.

À Universidade Estadual Paulista pela oportunidade do mestrado.

Ao professor orientador Paulo Torres Fenner pela oportunidade de realização do mestrado e orientação e ao professor co-orientador Kléber Pereira Lanças pela co-orientação e pela amizade.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Rural Maury e Emanuel pela ajuda nas análises de solo e pelas orientações durante o desenvolvimento do projeto e a professora Célia Zimback pelos esclarecimentos de dúvidas para confecção da monografia.

Aos colegas João Claudio (Songo), Éder Garcia, Ricardo (Jiraia), João (Mineiro) que ajudaram nas coletas de amostras de solo e de madeira no campo e na análise das mesmas; ao Danilo pela ajuda e amizade desde o começo do mestrado; ao Leandro pela ajuda para encontrar o local de desenvolvimento do projeto e outras tantas ajudas a mais; ao Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros, do Campus da UNESP de Itapeva pela liberação da estufa para secagem das amostras de solo e da balança para pesagem das amostras e ao Alex Costa, aluno orientado dele, que me indicou os locais para secagem das amostras; ao César pela ajuda na revisão do texto para a qualificação e aos demais amigos que não foram citados, mas que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

Ao Grupo Orsa, aos funcionários da Marquesa S/A e empreiteiras da área do experimento que me apoiaram no desenvolvimento do projeto em campo e pela amizade.

Ao colega de república Diego pela amizade. Ao Willian e Haroldo, colegas de república também, que contribuíram em muito no desenvolvimento desta dissertação.

Aos funcionários da secretaria do departamento de Ciência Florestal, Lurdinha e Silvia, e do departamento de Ciência do Solo, Selma e demais funcionárias da secretaria, pela ajuda e amizade durante a realização do mestrado.

À CAPES pela bolsa de estudo disponibilizada no mestrado.

SUMÁRIO

| | | Página |
|--------------|--|---------------|
| 1 | RESUMO..... | 01 |
| 2 | SUMMARY..... | 03 |
| 3 | INTRODUÇÃO..... | 05 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 07 |
| 4.1 | Características e exigências climáticas do <i>Pinus elliottii</i> Engelm var. <i>elliottii</i> | 07 |
| 4.2 | Produção Brasileira de Madeira..... | 08 |
| 4.3 | Densidade da madeira..... | 10 |
| 4.4 | Colheita Florestal..... | 12 |
| 4.5 | Sistemas de colheita florestal mecanizada..... | 14 |
| 4.6 | Trator Skidder | 15 |
| 4.7 | Danos ocasionados na operação de arraste de árvores e fustes..... | 16 |
| 4.8 | Processo de compactação do solo..... | 18 |
| 4.9 | Fatores que interferem na adequada extração de madeira por arraste..... | 28 |
| 4.10 | Manejo adequado para o arraste das árvores e fustes..... | 29 |
| 5 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 34 |
| 5.1 | Dados da área experimental..... | 34 |
| 5.1.1 | Local..... | 34 |
| 5.1.2 | Clima..... | 34 |
| 5.1.3 | Geologia..... | 35 |
| 5.1.4 | Solo..... | 35 |
| 5.2 | Dados do povoamento de Pinus..... | 35 |
| 5.3 | Forma de extração de madeira na Fazenda Guapiarinha..... | 35 |
| 5.4 | Trator Skidder utilizado no experimento..... | 37 |
| 5.5 | Tratamentos..... | 38 |
| 5.6 | Croqui da área experimental..... | 38 |
| 5.7 | Coleta das amostras de solo para densidade..... | 39 |
| 5.8 | Análises de solo..... | 42 |
| 5.8.1 | Densidade do solo..... | 42 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 5.8.2 | Umidade..... | 43 |
| 5.8.3 | Textura..... | 43 |
| 5.8.4 | Ensaio de Proctor normal..... | 44 |
| 5.8.5 | Limites de consistência do solo..... | 47 |
| 5.8.5.1 | Limite de liquidez..... | 47 |
| 5.8.5.2 | Limite de plasticidade..... | 48 |
| 5.8.5.3 | Limite de contração..... | 49 |
| 5.9 | Densidade da madeira..... | 49 |
| 5.10 | Volume de madeira..... | 51 |
| 5.11 | Análise da densidade da madeira..... | 51 |
| 5.12 | Análise estatística..... | 56 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 57 |
| 6.1 | Densidade do solo..... | 57 |
| 6.2 | Umidade do solo..... | 66 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 69 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|--|---------------|
| Tabela 1 – Descrição dos tratamentos do experimento..... | 38 |
| Tabela 2 – Valores de densidade da madeira dos discos coletados a campo..... | 53 |
| Tabela 3 – Dados de cada fuste arrastado durante o experimento..... | 54 |
| Tabela 4 – Dados do número de fustes arrastados por passada e massa total arrastada estimada pela densidade da madeira, em toneladas..... | 55 |
| Tabela 5 – Dados das repetições e coeficiente de variação..... | 58 |
| Tabela 6 – Análise de variância entre os dados dos recalques do pneu e dos fustes, das cinco passadas mais a testemunha e as camadas de 0,00- 0,05 e 0,10-0,15 m..... | 58 |
| Tabela 7 – Média das densidades do solo, em ambos os recalques, nas duas camadas estudadas..... | 59 |
| Tabela 8 – Valores da porcentagem de umidade do solo no recalque do pneu.... | 67 |
| Tabela 9 – Valores da porcentagem de umidade do solo no recalque do fuste.... | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|--|---------------|
| Figura 1 – Área representada em verde corresponde ao território de ocorrência natural do <i>Pinus elliottii</i> Engelm var. <i>elliottii</i> nos Estados Unidos da América (SEILER et al., 2010)..... | 07 |
| Figura 2 – Área em verde corresponde à distribuição de florestas plantadas com eucalipto no Brasil em 2009, área plantada em outros estados correspondem a 28.380 ha..... | 09 |
| Figura 3 – Área em verde corresponde à distribuição de florestas plantadas com pinus no Brasil em 2009, área plantada em outros estados correspondem a 490 ha..... | 09 |
| Figura 4 – Limites de distância de transporte e declividade de terreno para diferentes sistemas de colheita (Modificado de Studier e Binkley, 1981)..... | 29 |
| Figura 5 – (A) Representa o trator agrícola com Guincho TMO [®] arrastando os fustes e árvores do interior do talhão e ajudante do guincho ao centro da foto; (B) Momento em que o trator Skidder arruma os fustes e árvores na beirada do ramal secundário para arrastá-los até o pátio de processamento..... | 37 |
| Figura 6 – Trator Skidder utilizado pela empresa..... | 37 |
| Figura 7 – Croqui da área experimental..... | 39 |
| Figura 8 – (A) Foto do recalque da 1ª passada do pneu do trator Skidder; (B) Recalques dos fustes da 1ª passada..... | 41 |
| Figura 9 – (A) Momento da coleta de amostra indeformada de solo com o anel volumétrico e o “castelo”; (B) Amostras indeformadas coletadas no experimento..... | 41 |
| Figura 10 – (A) Amostras de solo para determinação do teor de água; (B) Foto da área do experimento..... | 42 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 11 – | Curva de compactação do Cambissolo Háplico, sendo que o solo utilizado encontrava-se a 1,80 m de profundidade..... | 45 |
| Figura 12 – | Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC)..... | 47 |
| Figura 13 – | Diferentes teores de água para determinação do Limite de Liquidez..... | 48 |
| Figura 14 – | Média dos valores de densidade do solo, das duas camadas e dois recalques, em relação à variável número de passadas..... | 60 |
| Figura 15 – | Média dos valores de densidade do solo, nas duas camadas, da interação entre os recalques e o número de passadas, para a variável recalque do pneu | 61 |
| Figura 16 – | Média dos valores de densidade do solo, nas duas camadas, da interação entre os recalques e o número de passadas, para o recalque dos fustes..... | 63 |
| Figura 17 – | Média dos valores de densidade do solo em relação a interação camadas e número de passadas na camada de 0,00-0,05 m..... | 64 |
| Figura 18 – | Média dos valores de densidade do solo em relação a interação camadas e número de passadas na camada de 0,10-0,15 m..... | 65 |

1 RESUMO

A compactação do solo tem sido considerada como um dos principais danos ocasionados pelas operações mecanizadas de colheita de madeira, sendo que ocorrem danos diretos ao solo, como a compactação do solo (aumento da densidade do solo), diminuição da aeração e da macroporosidade, presença de camada de impedimento ao crescimento radicular, disponibilidade de água, entre outros. Além dos danos diretos ocorrem os indiretos, que são restrição no crescimento das raízes das plantas, onde ocorrerá a diminuição do crescimento da parte aérea da planta, a susceptibilidade do solo ao processo erosivo, devido a camada compactada, entre outros. A extração de madeira com o trator Skidder é a etapa de colheita na qual se deve ter maior atenção, pois esta máquina provoca grandes danos ao solo, tanto pelo seu peso, quanto pelo arraste de árvores e fustes que realizam sulcos (recalques) no solo. Uma forma de diminuir a compactação do solo é deixar camada de resíduos florestais nos ramais de extração de madeira, com isso haverá a minimização do efeito de compressão do solo pelo trator Skidder com o peso da carga arrastada. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o nível de compactação do solo até a 5ª vez que o trator Skidder trafegou no ramal secundário de extração de madeira de Pinus (*Pinus elliotti* var. *elliotti*). A avaliação da compactação do solo na testemunha (densificação natural) até a 5ª passada demonstrou que houve compactação até a última vez que o trator Skidder trafegou na área, permitindo constatar que o tráfego de máquinas e fuste nas áreas de colheita promove a compactação do solo. Na interação entre os recalques e o número de passadas houve diferença nos níveis de compactação, sendo que com 5 passadas sobre a mesma área, o recalque do pneu apresentou uma menor compactação ($1,34 \text{ Mg.m}^{-3}$) quando comparado com o do fuste ($1,38 \text{ Mg.m}^{-3}$). Nas duas profundidades

estudadas, de 0,00-0,05 m e 0,10-0,15 m, em relação ao número de passadas, ocorreu diferença significativa para a variável profundidade, em que a profundidade de 0,00-0,05 m apresentou maior influência da compactação nas áreas que ocorrem o tráfego do trator Skidder e fustes.

Palavras-chave: densidade do solo, colheita florestal, recalque, camada compactada.

2 SUMMARY

SOIL COMPACTION OF A “CAMBISSOLO HÁPLICO” WITH THE SKIDDER TRACTOR TRAFFIC IN THE DRAFT OF “PINUS ELLIOTTII” TREES.

Botucatu, 2011, 89 f.

Dissertation (Master Science in Forest Science) – Agronomical Science College, Universidade Estadual Paulista

Author: JOSÉ CARLOS PEZZONI FILHO

Advisor: PAULO TORRES FENNER

Co-advisor: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Soil compaction has been considered one of the major damage caused to the operations of mechanized harvesting, and direct damage occurs to the ground as soil compaction (increased bulk density), reduced aeration and macroporosity, the presence Layer impediment to root growth, water availability, among others. Besides the direct damage occurring indirect damages, which are restricting the growth of plant roots, which occur in the reduction of shoot growth of the plant, susceptibility to soil erosion due to the fact that the presence of the compacted layer, between other damage. To minimize such damage recommend carefully planning machinery traffic on the steps of forest harvesting. With this, the logging with tractor Skidder is the stage at which harvesting should be given more attention, because this machine causes significant damage to land, both by weight and the drag tree trunks and carrying grooves (track) in the soil. One way to reduce soil compaction is to leave layer of forest residues on the extensions of logging, thereby minimizing the effect will be to compress the soil by tractor Skidder with the weight of the load dragged.

The aim of this study was to evaluate the level of soil compaction until the 5th time that the tractor Skidder the secondary extension of slash pine logging (*Pinus elliottii* var. *Elliotii*). The assessment of soil compaction in control (compression natural) until the 5th month showed that there was compaction until the last time that the tractor Skidder traffic in the area, allowing evidence that the traffic machines and tree trunks collection areas promote soil compaction. In the interaction between the track and the number of passes was no difference in levels of compression, with 5 being passed on to the same site, the track of the tire had a lower density (1.34 Mg.m^{-3}) compared to the tree trunks (1.38 Mg.m^{-3}). At both depths studied, 0,00-0,05 and 0,10-0,15 m, compared with the number of passes, significant difference for the variable depth in the 0,00-0,05 m depth showed higher effect of compaction occurring in the areas traffic tractor Skidder and tree trunks.

Keywords: bulk density, forest harvesting, track, compaction layer.

3 INTRODUÇÃO

A densificação do solo tem sua origem pelos processos naturais de formação do solo, formando camadas adensadas em determinadas profundidades no perfil do solo, quando é de forma natural e de forma acelerada causada principalmente pela ação antrópica nas práticas de manejo cultural das áreas utilizadas com culturas anuais, perenes e reflorestamentos. As práticas de manejo utilizadas que podem causar compactação são desde a simples queda da árvore no momento do corte até o tráfego de máquinas para colheita de grãos na agricultura e corte e processamento de árvores no reflorestamento.

Este dano ao solo ocasiona a desestruturação dos agregados do solo causando assim a diminuição do espaço poroso do solo, principalmente os macroporos, que são os responsáveis pela aeração, trocas gasosas entre a atmosfera e o solo, crescimento do sistema radicular das plantas, entre outros. Essa diminuição da porcentagem de macroporos, afeta também a adequada infiltração de água para as camadas mais profundas do perfil do solo, resultando no processo erosivo da camada superficial do solo e se este processo não for controlado pode passar para grandes voçorocas na área com perdas significativas de solo e adubos que seriam utilizados pela cultura.

A operação de arraste de árvores e fustes (a definição de fuste é o tronco ou parte deste sem a presença da copa da árvore) com o trator Skidder ocasiona uma série de danos ao solo. Entre estes, o que se destaca é a compactação do solo, nos recalques do pneu do trator Skidder e dos fustes, sendo que ocorrerá a formação de camadas mais densas do que a densidade natural no perfil do solo e haverá o impedimento do crescimento radicular. O impedimento do desenvolvimento adequado das raízes das plantas afetará o crescimento e produção da cultura com prejuízos produtivos da mesma e econômicos para

o proprietário. O Cambissolo Háplico, apresenta a vantagem em relação a solos mais intemperizados, como por exemplo, o Latossolo, que quando apresenta umidade que ocasionará prejuízos a estrutura do solo, o Cambissolo estudado sofrerá menor desestruturação com o tráfego a estas umidades, porém seu manejo tem que ser adequadamente planejado, pois se encontra em relevo ondulado.

Para a estimativa de compactação de um determinado solo, utiliza-se parâmetros estruturais do solo, como a porosidade (principalmente a macroporosidade), densidade e resistência a penetração. Pela avaliação desses parâmetros, realiza-se a quantificação de perdas da qualidade das características físicas do solo, sendo que com esta avaliação pode-se concluir se haverá prejuízo para o adequado desenvolvimento da cultura e tomar as devidas precauções para minimizar a compactação quando ocorrer na área. Além de interferir na adequada estruturação do solo, a compactação influencia nos processos químicos e biológicos do solo, pois para o metabolismo da fauna presente no solo, tem que haver a troca gasosa entre o solo e a atmosfera, desta forma evita-se o aumento da concentração de CO₂, o qual é prejudicial para o desenvolvimento dos organismos. Quanto aos processos químicos, a compactação afeta no processo de mineralização e disponibilidade de nutrientes, que são realizados por certos microrganismos do solo.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o nível de compactação do solo com o tráfego do trator Skidder no ramal secundário de extração de madeira de *Pinus (Pinus elliotti var. elliotti)* e a compactação do solo nos recalques (vulgarmente chamado de rastro) do pneu esquerdo do trator e dos fustes.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Características e exigências climáticas do *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*

Pinus elliottii Engelm var. *elliottii* pertence a classe Pinopsida, ordem Pinales e família Pinaceae. Segundo Pait et al. (1991), essa essência florestal tem como região de ocorrência natural o Estado da Carolina do Sul até o oeste do Estado da Lousiana, em uma estreita faixa próxima ao Oceano Atlântico no sudoeste dos Estados Unidos da América (Figura 1). Nesta região, este *Pinus* ocupa uma área de 5,1 milhões de hectares, respondendo por cerca de 12% do estoque de madeira existente.



Figura 1 - Área representada em verde corresponde ao território de ocorrência natural do *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* nos Estados Unidos da América (SEILER et al., 2010).

A altitude máxima da região de origem não ultrapassa 990 metros, precipitação média anual de 1270 mm, temperatura na região de origem oscila entre 18°C e 41°C, com média anual de 17,2°C (KRONKA et al., 2005).

Lamprecht (1990) citou que o *P. elliottii* Engelm var. *elliottii* cresce de 20 a 30 metros, podendo alcançar até 40 metros e com diâmetro na altura do peito (DAP) de 60 a 90 cm. O sistema radicular pode penetrar no solo até uma profundidade maior que cinco metros. De acordo com Schultz apud Pait et al. (1991), solos planos mal drenados, margens de rios e lagoas e áreas ocasionalmente alagadas como baias e pântanos formam o habitat natural desta espécie, porém, pode rapidamente colonizar sítios secos se as condições assim o permitirem.

4.2 Produção Brasileira de Madeira

Os dados apresentados a seguir foram baseados no Anuário Estatístico da ABRAF (2010), ano base de 2009.

Em 2009, a área total de florestas plantadas de eucalipto (Figura 2) e pinus no Brasil atingiu 6.310.450 ha, apresentando um crescimento de 2,5% em relação ao total de 2008, resultando em um acréscimo de 152.700 ha. Este resultado foi alcançado em função do crescimento de 4,4% na área plantada com eucalipto e queda de 2,1% na área com pinus, o que resultou em aumento de 2,5% da área acumulada com florestas plantadas com ambos os grupos de espécies em 2009. A área de florestas com eucalipto está em franca expansão na maioria dos estados brasileiros com tradição na silvicultura deste grupo de espécies, ou em estados considerados como novas fronteiras da silvicultura, com crescimento médio no país de 7,1% ao ano entre 2004-2009.

Por outro lado, a área plantada com pinus vem decrescendo de forma gradual no Brasil a partir de 2007 (com queda de cerca de 37 mil hectares em 2009, em relação ao ano anterior – Figura 3). No entanto, entre 2004-2009, a área manteve-se estável com crescimento médio anual de 0,3% ao ano.

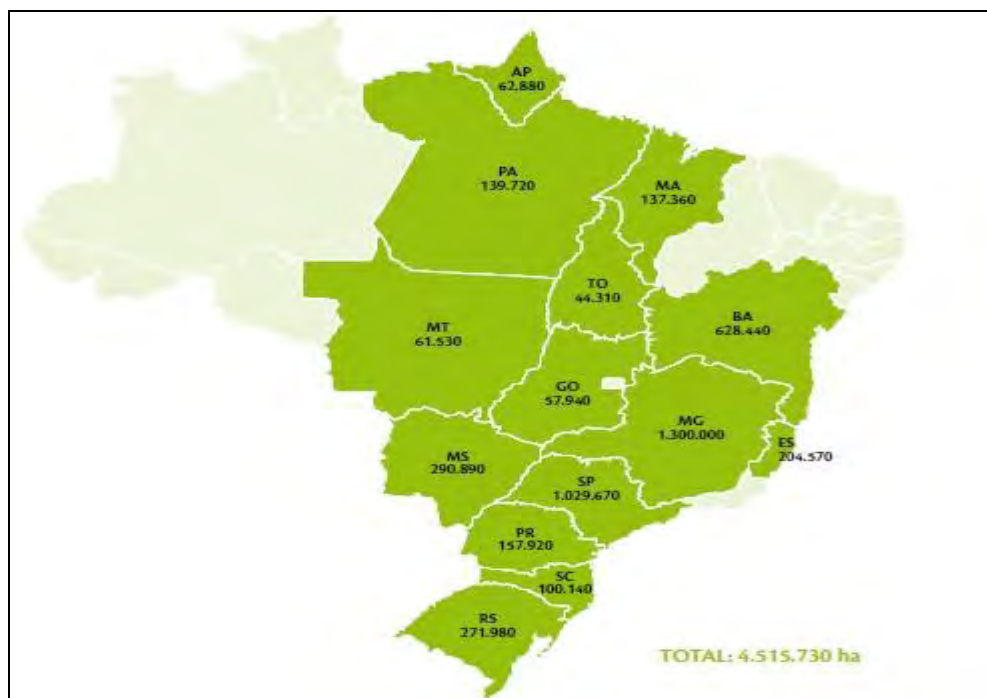


Figura 2 – Área em verde corresponde à distribuição de florestas plantadas com eucalipto no Brasil em 2009, área plantada em outros estados correspondem a 28.380 ha.

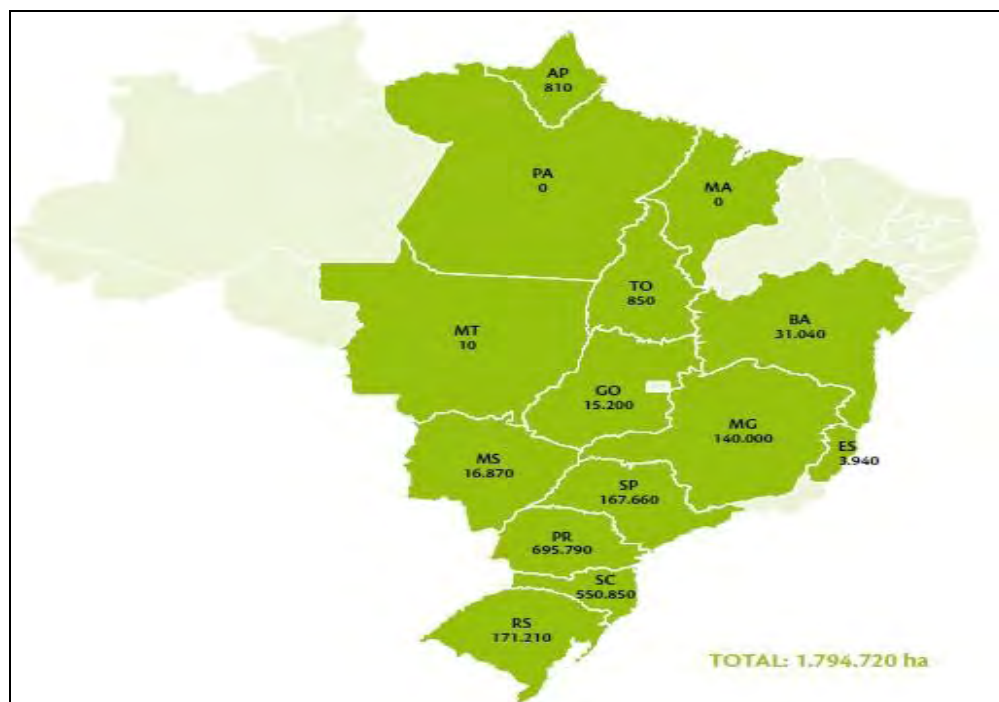


Figura 3 – Área em verde corresponde à distribuição de florestas plantadas com pinus no Brasil em 2009, área plantada em outros estados correspondem a 490 ha.

Quanto ao crescimento entre 2005 e 2009, o eucalipto obteve o maior crescimento no estado da Bahia, seguido por São Paulo, Maranhão, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, totalizando 143 mil ha. Já para o pinus, a maior redução de área foi observada no estado do Paraná, seguido por Minas Gerais, São Paulo e Bahia.

4.3 Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma propriedade resultante de fatores como dimensões das células, espessura e composição química da parede celular e percentuais de ocupação dos variados tipos de células (PANSKIN; DE ZEEUW, 1970). Segundo Foelkel et al. (1983), as dimensões dos elementos celulares variam em função da idade do vegetal.

Segundo Serpa et al. (2003), para obtenção de madeira mais densa, estável e com maior resistência à flexão e à compressão paralela às fibras, é necessário realizar a colheita de árvores mais velhas, pois estas tendem a possuir uma porcentagem maior de madeira adulta, que apresenta, então, maior resistência, maior densidade, além de ser mais estável dimensionalmente. Ballarin e Palma (2003), estudando a madeira de *Pinus taeda*, constataram um aumento em 26% da massa específica da madeira adulta em relação à juvenil. Dal Ponte Filho et al. (2004) verificaram para outras propriedades da madeira de *P. taeda* que houve aumento da média dos valores da massa específica, resistência à compressão e resistência à flexão, com o aumento da idade da população.

A densidade é um dos índices mais úteis que caracterizam as madeiras a partir do ponto de vista tecnológico, devido à alta correlação que tem na produção de polpa para celulose, entre outros usos da madeira (CORONEL, 1995). A densidade é uma propriedade física da madeira e dela dependem a maioria de suas características físicas e mecânicas, sendo assim utilizada na prática como referência para classificar a madeira que será utilizada para os mais variados fins (CORONEL, 1994).

A densidade da madeira varia entre espécies, entre indivíduos e procedências da mesma espécie e dentro da árvore, tanto no sentido longitudinal, ou seja, da base para o topo (BARRICHELO et al., 1983), como no sentido radial da medula para a

casca (BRASIL et al., 1977). Panshin e De Zeeuw (1970) apresentaram uma síntese dos padrões de variação longitudinal:

1. Decresce uniformemente com a altura;
2. Decresce até certo ponto e cresce deste, até o topo da árvore. Algumas vezes, pode decrescer levemente nas partes superiores;
3. Crescente da base para o topo, não obedecendo a um padrão uniforme de variação.

Segundo Lima et al. (1992) o gênero *Eucalyptus* tem se mostrado mais comum ao segundo padrão, acima descrito. Já o gênero *Pinus* tem o comportamento do primeiro padrão (BARRICHELO et al., 1983 e PANSHIN; DE ZEEUW, 1970).

Taras (1965) estudando algumas propriedades da madeira de *P. elliottii* e sua relação com a idade para cada tipo de lenho produzido pela espécie, observou uma diminuição da densidade básica do lenho juvenil com o aumento da idade, estabilizando-se de 8 a 12 anos. Por outro lado, a densidade básica da madeira adulta aumentou rapidamente neste período de crescimento, estabilizando-se em determinado momento e decrescendo na direção do córtex. Sobre o total dos anéis de crescimento (madeira juvenil e adulta), se pode evidenciar um aumento da densidade básica entre 8 e 12 anos, sendo que rapidamente ocorre um equilíbrio.

Erikson e Harrinson (1974) afirmaram que o aumento rápido da taxa de crescimento resulta em variações nas propriedades da madeira, entre elas um aumento na porcentagem de madeira juvenil, reduzindo assim a densidade básica da madeira e do comprimento dos traqueídes. Megraw (1985) determinou que a densidade da madeira do *P. taeda* aumenta do centro para a parte externa do tronco no sentido radial em toda a altura da árvore, mas é maior na base que no topo da árvore. Encontrou uma acentuada diminuição da densidade da madeira juvenil da base da árvore até 3 metros de altura, acima dos 5 metros a densidade manteve-se constante independentemente da altura. Peterson (1968) afirmou que normalmente tem-se a mudança da densidade da medula para a casca, sendo maior na madeira de outono e menor na madeira de primavera.

Knigge e Schulz (1966) afirmaram que as madeiras de coníferas com anéis de crescimento mais estreitos são mais pesados e resistentes, sendo que nas folhosas ocorre o contrário. A densidade da madeira produzida nas diferentes estações do ano é

diferente. Bortoletto Júnior (1993) encontrou as seguintes densidades básicas da madeira para algumas espécies de Pinus tropicais - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*, respectivamente, 0,43 e 0,44 g.cm⁻³ - plantadas no Estado de São Paulo, e 0,51 g.cm⁻³ para o *P. taeda*, de clima subtropical. Em Misiones, Argentina, Gonzales et al. (1993) encontraram 0,39 g.cm⁻³ para o valor de densidade básica de *P. taeda* com 13 anos.

Mendes et al. (1999) afirmaram que, em caso de retirar apenas uma amostra para determinação da massa específica da madeira, é importante determinar a melhor posição no tronco em que a massa específica corresponda à massa específica média da árvore, devido às variações ao longo do fuste, uma vez que normalmente a amostragem é feita ao nível do diâmetro a altura do peito (DAP), como nos trabalhos de Ferreira (1970), com *Eucalyptus alba* e *E. saligna* e de Ferreira et al. (1973) com *P. elliottii* var. *elliottii* e *P. taeda*. Neste sentido, Rezende et al. (1998) trabalhando com *E. grandis*, ao utilizar amostras do DAP como estimador da massa específica média da árvore, encontraram valores subestimados em 8%.

Brasil et al. (1982), estudando a variação da densidade básica da madeira de *P. elliotti* Engelm var. *elliottii*, em três regiões do Estado de São Paulo, para diferentes idades, concluíram que houve um aumento da densidade básica no DAP, de acordo com o aumento da idade da árvore, dentro de uma mesma floresta, porém Pinheiro et al. (1983), em um estudo com a mesma espécie de Pinus, de diferentes idades, concluíram que não houve diferenças significativas entre médias dos valores da densidade básica para as idades de 4, 5 e 7 anos, entretanto, houve uma tendência de aumento da densidade em função das idades das plantações.

Hassegawa (2003), em um estudo de massa específica de *P. taeda* em três classes diamétricas, verificou que a massa específica comportou-se de maneira semelhante nas três classes, decrescendo em direção ao topo. Como não houve diferença estatística significativa entre os valores médios de massa específica das três classes, o autor concluiu que a classe diamétrica exerce pouca influência na massa específica.

4.4 Colheita florestal

O corte é a primeira etapa da colheita florestal e tem grande influência na realização das operações subsequentes. Ele compreende as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento e é uma operação de grande importância por ser a etapa inicial do preparo da madeira. Após o corte ocorre a etapa de processamento, que consiste no desgalhamento, traçamento, empilhamento, descascamento e cavaqueamento (SANT'ANNA, 2008).

Subseqüentemente, ocorre a extração (que pode ser por baldeio ou arraste), sendo que Seixas (2008) cita que a extração manual é realizada com toras de dimensões pequenas, nas operações de desbaste de *Pinus* spp., pela ausência de espaço para entrada de máquinas e pelo corte raso em locais acidentados devido a falta de equipamentos adequados e com distância de extração indicadas entre 20 e 25 metros.

Extração de forma mecanizada é realizada com o trator Skidder, Forwarder, Trator Autocarregável, Trator Agrícola com Guincho Arrastador, Extração com Cabos Aéreos, entre outros. O Skidder tem sua capacidade de carga que irá depender de uma série de variáveis, como resistência ao rolamento, coeficiente de tração e atrito ocorrido onde a carga se apóia no solo. O Forwarder é um trator que gasta a maioria do seu tempo de operação com o carregamento e descarregamento de madeira e pode trabalhar em áreas com aclive de no máximo 30% ou com declive de 60%. Em virtude do custo elevado de aquisição dos Forwarders, foram feitas adaptações de máquinas agrícolas, sendo que o Trator Autocarregável é composto por trator agrícola com carreta e grua acoplados, sendo indicado para extração em florestas com inclinações laterais em torno de no máximo 10%.

Segundo Volpato et al. (1991), o trator agrícola com guincho arrastador, com potência bruta aproximada de 100 cv do motor, tem acoplado um guincho de arraste TMO-33t com um tambor com capacidade para 200 m de cabo de aço com 5/8" de diâmetro, sendo a sua aplicação otimizada na seguinte situação - distância de extração inferior a 50 m, largura da estrada superior a 4 m, equipe de trabalho de um operador e quatro ajudantes e declividade do terreno superior a 60%.

A extração com cabos aéreos não é muito difundida no Brasil, com algumas empresas tendo iniciado o seu uso no começo deste século. O alcance máximo dos modelos utilizados varia entre 300 e 600 metros, com arrastes laterais entre 15 e 25 metros

de cada lado. As equipes de arraste, por módulo de torre, são formadas por cinco a sete trabalhadores, com produtividade entre 29 e 37 estéreos por hora (KRETSCHKE et al., 2006).

No carregamento e descarregamento utiliza-se os seguintes métodos e maquinários que foram descritos por Minette et al. (2008). O método manual e a forma semimecanizada, carregamento e descarregamento mecanizado podem ser realizados com Carregadores Mecânicos com Pneus ou com Esteiras, Caminhões Autocarregáveis, Carregadores Frontais, Carregador Fixo, Descarregador Móvel, Pontes Rolantes e Guindaste.

4.5 Sistemas de colheita florestal mecanizada

Segundo Malinovski et al. (2008), os principais modais de sistemas de colheita mecanizada utilizados pelas empresas são:

- Motosserra + mini Skidder
- Motosserra + Autocarregável
- Motosserra + Guincho
- Motosserra + Torre Madeireira + Delimber + Slasher
- Harvester + Forwarder
- Feller-buncher + Skidder + Processador
- Feller-buncher + Skidder + Grade Desganhadora
- Feller-buncher + Skidder + Delimber + Slasher
- Slingshot + Forwarder
- Feller-buncher + Clambunk + Processador
- Feller-buncher + Skidder + picadores Móveis
- Combo: cabeçote de Harvester e Forwarder em uma mesma máquina.

No sistema Harvester + Forwarder, o Harvester realiza o corte, descascamento, toragem e o empilhamento das toras dentro do talhão e o Forwarder realiza o transbordo da madeira para a beirada da estrada principal. No sistema Feller-buncher +

Skidder + Processador, o Feller-buncher realiza somente o corte das árvores, formando feixes das árvores cortadas, e deixando-as dentro do talhão com angulação de 45 graus em relação à linha de corte para posterior arraste pelo trator Skidder até a beirada da estrada principal para o Processador realizar o processamento das árvores.

Estes são alguns exemplos dos sistemas de colheita de madeira utilizados para cortar, extrair, processar, transportar, etc, a madeira produzida em um determinado povoamento florestal, mas conforme algumas situações locais, como a topografia do terreno, por exemplo, são utilizados outros sistemas de colheita com determinadas combinações de maquinários para as etapas de colheita florestal.

4.6 Trator Skidder

O trator Skidder surgiu na década de 1960 e é um veículo versátil, forte, fácil de operar e econômico. Com esta máquina, pode-se trabalhar com diferentes tamanhos de árvores. O sistema Feller-buncher + Skidder tem sido otimizado para produção em sistemas de corte raso em larga escala. Os tratores Skidders podem ser equipados com esteiras rígidas, flexíveis ou com pneus. As esteiras rígidas são projetadas para prevenir a flexão e assegurar pressão uniforme sobre um terreno plano. As esteiras flexíveis, montadas em sua suspensão do tipo bogey, adaptam-se à superfície e aos obstáculos do terreno (SEIXAS, 2008).

Existem três tipos de tratores Skidders, sendo com cabo (chocker Skidder); com garra (grapple Skidder) e com pinças invertidas. A seguir são descritos os componentes de cada tipo e a metodologia utilizada em cada tipo de trator Skidder.

Skidders com cabo (chocker Skidder) são tratores de pneus, articulados, com um sistema de guincho na parte traseira e tração nas quatro rodas. O trator posiciona-se próximo às toras, sendo o cabo principal esticado até elas. Os cabos auxiliares (estropos) as enlaçam pelo lado de maior diâmetro e são engatados ao cabo principal. Após este procedimento é realizado o guinchamento até o trator, elevando-se uma das extremidades. Completado o guinchamento, o trator inicia a viagem até a estrada ou pátio, onde as toras são desengatadas e empilhadas com o auxílio da lâmina frontal. Este tipo de

Skidder é indicado para extração de toras dispersas na área, sendo recomendado para áreas pouco acidentadas (SEIXAS, 2008).

Skidder com garra (grapple Skidder): em relação ao de cabo, substitui-se o guincho pela garra hidráulica, de abertura inferior, o qual realiza o carregamento. Este tipo de Skidder é indicado para o arraste de toras que foram previamente empilhadas, tornando-se indispensável quando o corte for realizado por um trator feller-buncher (MACHADO, 1984). Devido à habilidade de manuseio rápido de feixes de toras, este tipo de Skidder mantém alta produtividade mesmo com a diminuição do tamanho das toras (SEIXAS, 2008).

Skidder com pinças invertidas (clambunk Skidder): o sistema de garra hidráulica de abertura inferior do trator anterior é substituído por uma garra de abertura superior (ou invertida), com a finalidade única de prender as toras ali colocadas, e por um braço hidráulico munido de uma grua que o torna autocarregável. Este Skidder possui elevada capacidade de carga, sendo muito versátil e extraindo toras dispersas ou não na área de extração (MACHADO, 1984).

Além do trator Skidder com pneus, existem também aqueles equipados com esteiras rígidas e flexíveis. Seixas (2008) descreveu que, de maneira geral, o Skidder com esteiras rígidas são usados em baixa velocidade para aplicações que exigem muita potência para empurrar ou puxar uma carga. Veículos de esteiras flexíveis são utilizados quando é desejada maior velocidade e a habilidade de empurrar ou puxar cargas mais pesadas for menos importante. Em terreno de superfície mais acidentada, este tipo de esteira pode exercer uma pressão mais uniforme sobre o solo do que um equipamento com esteira convencional ou rígida.

4.7 Danos ocasionados na operação de arraste de árvores e fustes

Na operação de arraste ocorre o revolvimento e compactação do solo, que irá danificar a estrutura e seus processos naturais de infiltração da água das chuvas, trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e entre as raízes e o solo, desenvolvimento dos microrganismos presentes no solo, entre outros. Assim, haverá um reflexo indireto,

geralmente negativo, no crescimento do povoamento florestal e também ocasionando o início do processo erosivo na área, entre outros danos.

Entre os equipamentos tipicamente florestais, algumas restrições são feitas ao uso de tratores Skidders no arraste de árvores e fustes, em termos da compactação, distúrbios no solo, sulcamento e realocação de nutrientes (MCNEEL; BALLARD, 1992). Dentre as operações de colheita florestal uma das que mais danificam o solo é o arraste das árvores e fustes com o trator Skidder ou com tratores convencionais de arraste. Geralmente ocorre um grande revolvimento do solo no local em que árvores e fustes são arrastados formando sulcos que propiciam a erosão do solo e a formação de voçorocas.

Souza et al. (2002) citaram os principais problemas relacionados à operação de arraste de madeira, que podem ser a compactação do solo, passagem da máquina sobre as pilhas de árvores e arraste de material para a margem do talhão, bem como a perda de rendimento em função das condições do solo, do povoamento e do clima. Essas condições têm levado ao uso freqüente de máquinas com rodados de semi-esteiras ou esteiras, principalmente no arraste de madeira em condições de solos úmidos e em relevos acidentados (BYGDÉN et al., 2003).

Um problema raramente observado nas operações florestais, com efeitos que perduram por muitos anos e que pode afetar todo o ecossistema florestal e sua produtividade, são as deformações físicas do solo. Para haver equilíbrio, a resistência exercida pelo solo (capacidade de suporte de carga) deve ter a mesma intensidade da pressão exercida pelo tráfego, ou seja, a massa do veículo (FENNER, 2002). Segundo Silva (2002), a extração com o método de arraste por trator Skidder induz ao surgimento do processo de erosão do solo, tendo em vista a sua compactação e sulcamento do solo, sendo que recomendou planejar criteriosamente a extração, de modo a mitigar o tráfego do trator Skidder.

Com o tráfego dos maquinários no processo de extração por arraste das árvores e fustes, ocorre a formação de sulcos no solo, que segundo Hofmann (1988) e Meek (1994), acontece devido ao rearranjo das partículas do solo, em decorrência de uma pressão externa, neste caso ocasionada pelo arraste das árvores e fustes pelo trator. Kondo e Dias Júnior (1999) consideraram que o sistema de manejo do solo altera as propriedades

físicas e mecânicas do solo com diferentes níveis de compactação, em função do teor de água, das diferentes classes de solos e da época de realização das operações mecanizadas.

Em acompanhamento feito com o GPS instalado em um trator Skidder, o tráfego efetivo do rodado ocorreu em 30% da área plantada, mas 85% da área total apresentaram algum tipo de distúrbio do solo causado também pelo arraste do feixe de árvores (SEIXAS et al., 2003b). Em um estudo efetuado por Lanford e Stokes (1995), o sistema de colheita de madeira com trator Skidder apresentou praticamente o dobro de distúrbio do solo (65 contra 34%) e produziu mais compactação do que o sistema com Forwarder.

Dentre os impactos decorrentes da atividade de colheita de madeira, os danos às rebrotas e à estrutura do solo merecem atenção especial, em virtude dos reflexos negativos que podem provocar sobre a floresta, caso a brotação seja conduzida para formação da futura floresta (ANDRADE et al., 2000).

4.8 Processo de compactação do solo

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004). As causas das alterações na densidade do solo podem ser naturais, sendo difíceis de serem avaliadas e de ação lenta no solo como, por exemplo, a eluviação de argilas, ou artificiais por forças mecânicas originadas da pressão causada pelo tráfego de máquinas e ação de implementos sobre o solo (SECCO et al., 2004). Para Reichert et al. (2007), a compactação é o resultado da ação antrópica e o adensamento é um fenômeno natural.

Os solos sofrem intensas mudanças nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas durante sua formação natural e como resultado de processos antropogênicos. Na atividade agrícola e florestal, a deformação e o cisalhamento do solo pela compactação e a erosão hídrica são considerados os processos mais prejudiciais. Esses processos resultam não apenas na redução da produtividade do local, mas também

contribuem para a poluição da água com escoamento superficial, emissão de gases e alta exigência energética para obter elevadas produtividades (HORN, 2003).

Segundo Camargo e Alleoni (1997) a compactação do solo é ainda alterações no arranjo das partículas do solo condicionadas por fatores internos, como textura, estrutura, alternância de secagem e umedecimentos, e externos, como o tráfego de máquinas e implementos, principalmente quando efetuado em determinadas condições de umidade. A compactação, geralmente, diminui o volume ocupado por determinada massa de solo e o tamanho dos macroporos do solo, que permitem livre circulação de ar e água. Por conseguinte, modifica os atributos físicos do solo, como aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração, que afetam a disponibilidade dos nutrientes para as plantas, as condições do solo para desenvolvimento de microrganismos e a região ocupada pelas raízes - a rizosfera.

O tráfego de veículos pesados modifica a estrutura do solo, causando rompimento de suas resistências naturais, que se encontram interligadas por forças de atração e repulsão e, conseqüentemente, alterando o fluxo de água no solo. Assim, ocorrerá a redução da produtividade da floresta e aumento dos níveis de erosão, já que geralmente reduz a taxa de infiltração, aumentará o escoamento superficial, uma vez que a velocidade da água no perfil do solo depende do tamanho dos poros. Os efeitos do conteúdo de água se alteram com as características do solo e o esforço de compactação aplicado sobre este. Se o teor de água aumenta, a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação entre as partículas do solo. Para os valores de densidades que são considerados prejudiciais, consideram-se em torno de 15 a 20% maiores que o valor inicial da densidade média do solo (SEIXAS, 2000).

Um aumento na densidade é representativo do impacto do tráfego de máquinas na compactação do solo. Mudanças na densidade do solo servem como índices das mudanças nas propriedades físicas que regulam o crescimento das raízes (SEIXAS; MAGRO, 1998). As propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural, utilizadas para quantificar os impactos causados pelo uso e pelo manejo do solo são a compactação do solo (HAKANSSON et al., 1988), a resistência do solo à penetração (TORMENA; ROLOFF, 1996; BEUTLER et al, 2001), a densidade (DE MARIA et al.,

1999), a porosidade total e o tamanho e a continuidade dos poros do solo (BEUTLER et al, 2001; OLIVEIRA et al, 2001).

Horn et al. (2004) constataram ser nula a possibilidade de as máquinas utilizadas na colheita florestal não causarem sérios danos estruturais na compactação dos solos, considerando que todas as máquinas utilizadas no estudo, com peso variando de 8,71 - 45 t, causaram impacto em um Cambissolo (aproximadamente 443 g.kg⁻¹ de areia, 283 g.kg⁻¹ de silte e 223 g.kg⁻¹ de argila), atingindo pressões que excederam a pressão de preconsolidação, resultando em deformações plásticas.

Segundo Lima e Sirtoli (2006), a compactação ocorre quando as forças mecânicas impostas pelo tráfego das máquinas são superiores à capacidade de suporte do solo. Em consequência, a estrutura do solo é modificada, alterando o arranjo de agregados, e gerando mudanças na porosidade, que, conseqüentemente, refletem nos fluxos da solução e ar do solo. Dessa maneira, as plantas são submetidas a situações adversas ao seu desenvolvimento, devido, principalmente, às limitações apresentadas ao estabelecimento do sistema radicular, podendo, haver comprometimento da produção de madeira nas áreas de reflorestamento.

A compactação pelo tráfego de tratores e implementos agrícolas tende a ser mais expressiva nas camadas mais superficiais, o que resulta no aumento da energia de tração (HÅKANSSON, 2005), causando maiores gastos com combustíveis; bem como redução da profundidade explorada pela raiz (COLLARES et al., 2006). Reichert et al. (2007) citam que em áreas agrícolas a compactação ocorre até os 0,20 m de profundidade, enquanto em áreas florestais atinge maiores profundidades. Lima et al. (2000) analisaram o impacto provocado pelo tráfego do feller-buncher e do trator Skidder e concluíram que houve um acréscimo de 19,6% na densidade do solo devido ao tráfego das máquinas nos primeiros 0,10 m de profundidade.

Porém, segundo Keller et al. (2002), os efeitos detrimenais na camada superficial do solo podem ser considerados de menor importância, uma vez que esta compactação pode ser removida por ocasião do preparo do solo. A maior preocupação deve estar focada na compactação subsuperficial, uma vez que a remoção da compactação

no subsolo demanda altos custos bem como também implica em reduções na produtividade das culturas (ALAKUKKU et al., 2003; CHAMEN et al., 2003).

A compactação subsuperficial é função da carga total por eixo, já a compactação superficial é função da pressão de insuflagem dos pneus (SALIRE et al., 1994; HAKANSSON; VOORHEES, 1997). A passada do rodado traseiro (pressão de inflação de 137,90 kPa) de um trator com massa total com lastro de 7.324 kg aumentou os valores de pressão de preconsolidação na superfície (0,00-0,05 m) de um Latossolo Vermelho distrófico (SILVA et al., 2003).

A deterioração da estrutura do solo devido à compactação depende de vários fatores, destacando-se a textura do solo (LARSON et al., 1980; IMHOFF et al 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003). A porosidade total e a densidade podem ser bons indicadores da condição estrutural do solo (REICHERT et al., 2003).

Dexter (1988) afirma que a estrutura do solo é amplamente variável no espaço e no tempo, além de ser modificada pelas práticas de manejo adotadas. Assim, a densidade do solo tem sido utilizada como indicador do impacto de práticas de manejo sobre a qualidade física do solo (LEÃO, 2002; IMHOFF, 2002).

Capurro (2005) salienta que a redução da porosidade é um dos maiores impactos produzidos pela compactação do solo, resultando em maior resistência das raízes para buscar água e nutrientes. As modificações nestas propriedades ocasionadas pelo manejo inadequado resultam em decréscimo de produção (RADFORD et al., 2001; DAUDA; SAMARI, 2002), aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo do solo (CANILLAS; SALOKHE, 2002).

Para Queiroz-Voltan et al. (2000) a compactação começa afetando o crescimento radicular, com consequências para a parte aérea e produtividade. Mesmo em um solo com condições de acidez adequada e boa adubação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, pois com desenvolvimento radicular prejudicado, a taxa de absorção dos nutrientes diminui. Além disso, há a diminuição do

espaço poroso do solo, diminuindo a quantidade de oxigênio disponível, e assim limitando o desempenho de processos metabólicos das plantas.

O sistema radicular identifica e integra todas as condições, no espaço e tempo, de modo semelhante à parte aérea das plantas, que está exposta a trocas constantes de ambiente, indicando claramente que estresses na parte aérea e sistema radicular são igualmente importantes (REICHERT et al., 2003). Segundo Silveira (2001), em solos compactados há prejuízos no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, acarretando outros problemas, como dificuldade de mobilidade dos fertilizantes, baixa infiltração de água e diminuição das trocas gasosas entre solo e a atmosfera, reduzindo os níveis de oxigênio necessário para a renovação da microflora.

Silva et al. (2006c) encontraram redução da produção de matéria seca de raízes e densidade radicular de *Eucalyptus urophylla* devido a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo oxídico-gibítico (440 g.kg⁻¹ de areia, 90 g.kg⁻¹ de silte e 470 g.kg⁻¹ de argila) em vaso, na umidade de 0,20 kg.kg⁻¹, em relação às demais umidades (0,05 e 0,10 kg.kg⁻¹). Em um Latossolo Amarelo caulínico (450 g.kg⁻¹ de areia, 40 g.kg⁻¹ de silte e 510 g.kg⁻¹ de argila), houve redução apenas da densidade radicular com a compactação nas umidades de 0,10 e 0,20 kg.kg⁻¹. Porém, De Jong-Hughes et al. (2001) afirmam que um solo ligeiramente comprimido pode apressar a taxa de germinação das sementes, porque promove um bom contato entre a semente e solo. Além disso, uma compactação moderada pode reduzir a perda de água do solo por evaporação e, conseqüentemente, impedir que o solo em torno da semente seque rapidamente.

Lockaby e Vidrine (1984) constataram reduções no crescimento em altura de uma floresta de *Pinus taeda* variando entre 40 e 60%, apesar da compactação do solo ter se restringido unicamente aos 0,05 m próximos à superfície. O decréscimo na produção de uma cultura após a compactação do solo reflete os efeitos sobre o sistema radicular das plantas que podem incluir interações complexas entre resistência do solo, disponibilidade de água e nutrientes, aeração e populações micorrízicas (GREACEN ; SANDS, 1980).

Suzuki (2005) afirma que a avaliação do sistema radicular, mesmo que apenas visual, é um bom indicativo da condição física do solo. Diversas investigações

têm demonstrado que a planta compensa o menor crescimento radicular em profundidade aumentando o volume de raízes na camada de solo acima da que se encontra compactada (ROSOLEM et al., 2002; SILVA, ROSOLEM, 2002; FOLONI et al., 2003; BEUTLER, CENTURION, 2004). Alteração da morfologia da raiz de *Araucaria angustifolia*, com raízes superficiais, raízes laterais finas e comprimento da raiz principal reduzido, que foi compensado por aumento em diâmetro da raiz principal, resultando em similar acúmulo de biomassa, foi verificada em diferentes níveis de compactação (MÓSENA, DILLENBURG, 2004).

MacNabb e Froehlich (1983) afirmaram que a maior parte da compactação total em uma trilha de arraste já ocorria nas primeiras passadas de uma máquina. Pelo menos 60% do aumento esperado para a densidade em uma trilha com uso elevado (mais de 20 passadas) ocorriam após as primeiras três a cinco passadas.

Em estudo feito em um Latossolo Vermelho-Amarelo, a compactação do solo aumentou com o maior número de passadas de um “forwarder”, com 42,3 t de peso total carregado, atingindo, após 11 passadas, 74% da compactação final resultante de 25 passadas do trator, não tendo sido significativa após uma passada (SEIXAS et al., 2003a). Já na análise da compactação, causada também em outro Latossolo Vermelho-Amarelo, devido ao tráfego de um trator Skidder de garra, pesando 13,5 t, e mais 4,0 t de um feixe de árvores, observou-se que a compactação após cinco passadas do trator representou cerca de 75% em média do nível máximo de compactação, atingido no perfil até 0,15 m abaixo da superfície do solo, após um total de 25 passadas (SEIXAS et al., 2003b).

O risco de compactação é elevado quando as pressões aplicadas sobre o solo são maiores do que a capacidade de suporte, sendo a umidade um dos responsáveis por esse decréscimo da capacidade de suporte (ALAKUKKU et al., 2003). Dias Júnior (2000) enfatizou que a umidade é um fator que determina a capacidade de suporte de carga do solo. Seixas (2000) afirmou que os efeitos do conteúdo de água se alteram com as características do solo e o esforço de compactação aplicado sobre este. Se o teor de água aumenta, a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação entre as partículas do solo, e assim atingindo os limites plásticos, onde a compactação se torna mais crítica.

Seixas et al. (1998) verificaram a compactação do solo devido ao tráfego de colheita de madeira nos módulos harvester e forwarder; feller-buncher e trator Skidder. Os testes realizados, durante a época chuvosa, apresentaram resultados com maior compactação do solo, em termos de incremento em relação à condição inicial, refletindo a influência da umidade do solo em termos de rearranjo das partículas. O feller-buncher e o trator Skidder não apresentaram níveis críticos de compactação ao trafegarem em solo de textura arenosa.

A umidade é o fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo (FIGUEIREDO et al., 2000). A água no solo atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas. Desta forma, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento da umidade. Este processo continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, a cada incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida (SMITH et al., 1997; SILVA et al., 2000b).

A umidade é fator importante que influencia a compactação do solo, atuando como um lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas do solo quando este é submetido a pressões. A relação entre a umidade e compactação do solo é dependente do tipo de solo. A densidade do solo aumenta em resposta às pressões de compactação (0, 60, 120, 180 e 240 kPa) obtidas em uma prensa hidráulica, sendo esse efeito mais intensificado com aumento da umidade do solo (0,05, 0,10 e 0,20 kg kg⁻¹) para um Latossolo Vermelho-Amarelo oxidico-gibítico (440 g kg⁻¹ de areia, 90 g kg⁻¹ de silte e 470 g kg⁻¹ de argila) e um Latossolo Amarelo caulínico (450 g kg⁻¹ de areia, 40 g kg⁻¹ de silte e 510 g kg⁻¹ de argila), em vaso, concluindo que a água é o fator determinante para que ocorra compactação, uma vez que facilita o ajuste das partículas e reduz a resistência dos agregados à deformação física. (SILVA et al., 2006c).

A susceptibilidade dos solos à compactação pode variar muito em virtude de diferentes fatores. Entretanto, considerando que para certa condição de textura e teor de carbono orgânico no solo o fator que determina a magnitude da deformação é o conteúdo de água, pode-se condicionar o tráfego em razão do teor de água do solo (DIAS JUNIOR, 2000; SEIXAS, 2000).

Severiano et al. (2010) comentaram que apesar dos maiores conteúdos de água no Cambissolo Háplico em todas as épocas de colheita, os impactos das operações de colheita mecanizada nesse solo foram sempre inferiores aos observadas no Latossolo Vermelho-Amarelo. Na época de maior intensidade pluvial da região (03/2006), a compactação nesse último solo, além de adicional, foi também crítica às funções edáficas em 100% das amostras coletadas após o tráfego do maquinário. Para o Cambissolo Háplico, a limitação atingiu apenas 17% dos pontos.

A uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressivo quanto menor a densidade e menor o potencial de água. Solos arenosos apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação) (LIMA et al., 2004).

O comportamento compressivo de diferentes solos (teor de argila variando entre, aproximadamente, 97 e 657 g.kg⁻¹) mostrou que solo mais argiloso, dada a sua maior capacidade de retenção de água, mostrou necessidade de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresenta maior susceptibilidade à compactação adicional, quando cargas superiores às que o solo já sofreu são aplicadas (SUZUKI, 2005). A explicação para esse fato é que a água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo que irá atuar como um lubrificante, facilitando o deslocamento e rearranjo das partículas nos vazios do solo (SILVA et al., 2000b). Esses autores afirmam que, especialmente para solos argilosos, deve-se ter cuidado para evitar o tráfego excessivo sobre o solo úmido.

Em geral, os solos argilosos são mais suscetíveis à compactação pelo tráfego de máquinas do que os mais arenosos, devido à sua maior porosidade total e à sua maior capacidade de armazenamento de água nos microporos (SILVA, 1999). Silva et al. (2006c) constataram que a relação entre a umidade e a compactação é dependente do tipo de solo. A densidade aumentou devido à diferentes pressões de compactação, sendo que o efeito intensificou com aumento de distintas umidades para alguns tipos de solos, em condições de vaso.

Cada solo apresenta um comportamento em relação à compactação, principalmente pela sua distribuição do tamanho de partículas e mineralogia. O incremento da matéria orgânica no solo e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, além de contribuírem para maior atividade biológica e disponibilidade de nutrientes para as plantas, podem minimizar o efeito da compactação. O efeito da matéria orgânica na redução da densidade máxima do solo pelo teste de Proctor Normal foi maior para um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (155 g.kg^{-1} de argila) do que para um Nitossolo Vermelho distrófico (787 g.kg^{-1} de argila) (BRAIDA, 2004). Esse comportamento foi atribuído ao fato de que no solo arenoso o efeito da matéria orgânica em reduzir a atuação da água entre as partículas minerais é maior do que no argiloso.

Silva et al. (1999), avaliando a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro (oxídico) e um Cambissolo (caulinítico) com base na pressão de pré-compactação, verificaram que o primeiro apresentou maior suscetibilidade à compactação para todas as condições avaliadas. Segundo os autores, esse comportamento está relacionado aos tipos de arranjo das partículas nos dois solos, sendo que, a estrutura granular do Latossolo confere um maior número de espaços porosos e, conseqüentemente, maior possibilidade de ajustes por ocasião do tráfego de máquinas. Já o Cambissolo, cuja estrutura é em blocos e, portanto mais adensada (RESENDE et al., 2002) lhe confere uma maior resistência à compactação.

Santos et al. (2005) realizaram experimento em Cambissolo Háplico e constataram que a maior capacidade de suporte de carga deste solo se deve provavelmente ao maior teor de matéria orgânica e ao maior ajuste entre e dentro dos agregados de tamanho pequeno a médio no formato de blocos com grau de coesão moderado a forte, em comparação à estrutura do LVA, que é formada também de agregados pequenos a médios no formato de blocos, mas que se desfazem em grânulos muito pequenos e com forte grau de coesão, ambos na camada de 0,00 a 0,05 m.

Segundo Rocha et al. (2002), solos em estado mais jovem de desenvolvimento (Cambissolos, por exemplo), que apresentam maiores valores nas relações K_i ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) e K_r ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) e maiores teores de silte, podem apresentar menor grau de estruturação, com conseqüente redução do contato entre as partículas,

favorecendo à menores forças de atrito interno e resistência ao cisalhamento. Apesar de o Cambissolo Háplico, estudado por Severiano et al. (2009), apresentar maior flexibilidade para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, por possuir maior capacidade de suporte de carga, salienta-se que esse solo está inserido em relevo movimentado, sugerindo a necessidade de cuidados especiais no seu uso para evitar problemas a sua conservação.

Percebe-se que a compactação pode causar um problema não apenas pontual, mas difuso, podendo afetar toda uma região, pela contaminação das águas e assoreamento dos rios. É importante avaliar a capacidade de o solo ser usado para práticas agrícolas, florestais ou pastagem, podendo-se, dessa forma, manejá-lo da melhor forma possível e evitar sua degradação. Solos de floresta natural com baixos valores de densidade do solo, pressão de preconsolidação e alta permeabilidade, por exemplo, são altamente vulneráveis à compactação (HORN et al., 2004).

A avaliação da intensidade e da ocorrência da compactação e dos limites críticos da porosidade, da densidade e da resistência do solo à penetração, que possam vir a afetar o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento das culturas possibilita uma ação mais consciente em relação ao manejo do solo (SUZUKI, 2005).

Não existe consenso entre os autores sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. Torres e Saraiva (1999) afirmam que a densidade varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos varia de 1,0 a 1,45 Mg.m^{-3} para condições de mata e muito compactados, respectivamente e para solos arenosos apresentam densidades variáveis entre 1,25 a 1,70 Mg.m^{-3} respectivamente. Camargo e Alleoni (1997) consideram crítico o valor de 1,55 Mg.m^{-3} em solos franco-argilosos a argilosos. De Maria, Castro e Dias (1999) constataram que em Latossolo Roxo, ocorre restrição ao desenvolvimento de raízes acima de 1,2 Mg.m^{-3} .

A dificuldade para a definição e, conseqüentemente, para a adoção de um valor crítico para propriedades e atributos de solo reside no fato de que esses não são determinantes diretos do crescimento das plantas, diferentemente do ar, água e temperatura, que influenciam diretamente o crescimento das plantas. Além disso, as propriedades e atributos do solo atuam de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento e,

assim, a definição de um valor específico para uma propriedade pode não ter significado, quando analisado isoladamente (REICHERT et al., 2003). Outra dificuldade é que solos (BRAIDA, 2004; SILVA et al., 2006b,c), culturas (SILVA et al., 2006a; FOLONI et al., 2006) e até mesmo os cultivares dentro de uma mesma espécie (GUIMARÃES et al., 2002; BEUTLER et al., 2006) respondem diferentemente aos níveis de compactação do solo.

4.9 Fatores que interferem na adequada extração de madeira por arraste

Machado (1984) destacou que para o trator Skidder ter a máxima eficiência, a declividade do terreno deve estar entre 30% no sentido favorável e 10% no sentido adverso; o pneu deve estar com pressão compatível com as condições e o tipo de solo. O trator florestal Skidder deve ser compatível com a carga que será arrastada. Para Conway (1976), o limite máximo aceitável para o trabalho com tratores de esteira, sendo que nessa categoria entraria o trator Skidder com esteiras, estaria entre 50 e 60%, acima desse, mesmo com a construção de estradas ou trilhas, é desaconselhável, em virtude do alto custo de construção, da remoção de solo e ocorrência de erosão.

A compactação causada por uma determinada máquina depende também se a máquina está trafegando morro acima ou abaixo, o que altera a carga relativa das esteiras ou rodas (SIDLE; DRLICA, 1981). Aliado às questões técnicas e de segurança, recomenda-se um limite máximo de inclinação do terreno de 35% para a entrada de máquinas em áreas florestais mais acidentadas, excetuando-se o uso de guinchos, teleféricos e helicópteros.

Studier e Binkley (1981) citam o limite máximo de extração de madeira com o trator Skidder é de no máximo 300 metros, sendo que acima desta distância é recomendado a utilização do Forwarder até a distância de 450 metros e declividade máxima de 20%. Acima desta distância de extração e com declividade entre 30% e 90% recomenda-se utilizar o skyline ou o sistema de teleférico. Superior a 90% de declividade, realiza-se a extração por balão e por helicóptero (Figura 4).

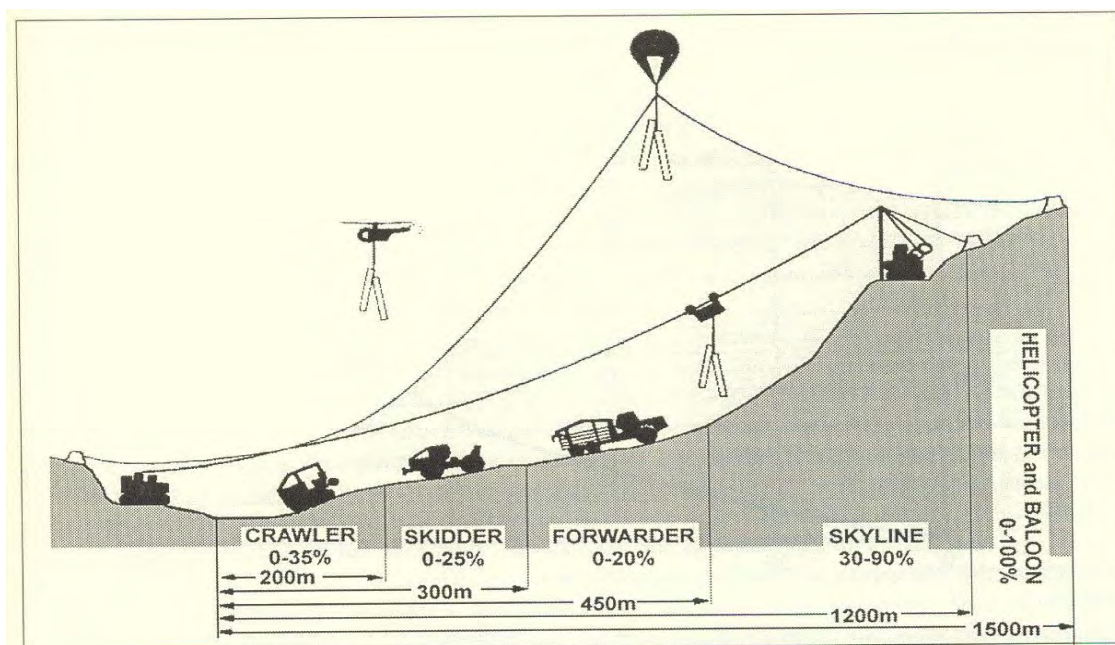


Figura 4 – Limites de distância de transporte e declividade de terreno para diferentes sistemas de colheita (Modificado de STUDIER e BINKLEY, 1981).

O teor de água do solo e sua textura influenciam na capacidade de carga do trator Skidder, que também é dada por uma série de variáveis, como resistência ao rolamento, coeficiente de tração e atrito ocorrido onde a carga apóia-se no solo. O tipo de solo está relacionado com a capacidade de sustentação e tração do equipamento. Estas características vão depender também do teor de umidade do solo, ocorrendo um processo de compactação acentuada em teores mais elevados de umidade e mesmo, por vezes, a total incapacidade de movimentação do veículo em determinado tipo de solo e conteúdo de umidade (SEIXAS, 2002).

4.10 Manejo adequado para o arraste das árvores e fustes

É importante realizar alguns cuidados para a redução do efeito da compactação, tais como: usar uma adequada pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005), utilizar tráfego controlado (BOTTA et al., 2004), trafegar em condições de friabilidade do solo e usar mecanismos rompedores de solo com mínima perturbação da estrutura, sendo que a descompactação deve ser realizada por meio do

fissuramento e não pela rotação do solo, como é realizado na aração, onde o emprego de escarificadores contribui para tal feito, mas na contextualização da semeadura direta o emprego de haste sulcadora poderá favorecer a descompactação (SPOOR et al., 2003).

Uma combinação de práticas é sugerida para mitigar ou retardar o problema, como cultivo mínimo ou plantio direto, tráfego controlado, combinação de mais de uma operação simultaneamente, usando a mesma máquina para minimizar o número de passadas, minimizar o tráfego, minimizar a intensidade de pastejo e o número de animais por pastejo, bem como para manter o solo coberto com vegetação, aliviar a compactação do solo usando rotações que incluam plantas com sistema radicular agressivo e profundo capaz de penetrar em camadas compactadas, usar máquinas com baixa carga por eixo e pneus com elevada área de contato para minimizar a pressão no solo (REICHERT et al., 2007).

O tráfego controlado, quer pela redução no número de operações mecanizadas durante o ciclo da cultura, quer pela fixação de linhas permanentes de tráfego, deixando livres de compactação as zonas de cultivo e reduzindo a casualização do tráfego, constitui alternativa que pode contribuir para minimizar a compactação nas áreas agrícolas. O tráfego controlado tem sido sugerido por vários autores (HAMZA; ANDERSON, 2005; RAPER, 2005; BRAUNACK; MCGARRY, 2006; CHAN et al., 2006; ROSA, 2007).

Rosa (2007) também constatou efeito benéfico do tráfego controlado na manutenção da estrutura de um Latossolo Vermelho distrófico. Além dos benefícios relacionados com o solo, o menor gasto de combustível e a menor necessidade de trabalho das máquinas são outros fatores favorecidos pelo tráfego controlado. Jorajuria e Draghi (2000) comentam que o peso da máquina é o fator que determina a profundidade da compactação do solo, independentemente da pressão aplicada na sua superfície. Botta et al. (2002) complementam que o uso do carregamento adequado entre eixos e o uso de rodado duplo podem minimizar a compactação na camada superficial, mas deve-se cuidar com as perdas de resistência do rolamento ao utilizar essa prática.

A utilização inadequada da pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (RICHART et al., 2005; TESSIER; LAGUE, 1991; HÅKANSSON, 2005) proporciona o processo de compactação do solo. O tráfego de máquinas, em solo úmido, durante a realização das atividades florestais é um dos fatores que determinam a quantidade

de deformação que poderá ocorrer no solo. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas. Nessa condição, a compactação do solo pode não ser significativa (DIAS JUNIOR, 1994). Já Aust et al. (1993) constataram que para condições de alto teor de água não houve aumentos significativos da compactação e que a densidade teve variações amortecidas.

Lanças et al. (2005) enfatizaram que não é conveniente realizar certas operações mecânicas a partir de determinados teores de água. Logo, é necessário determinar a pressão de pré-consolidação do solo, a fim de estabelecer os limites de teor de água para cada solo e para cada carga aplicada no mesmo, a partir do qual o tráfego de máquinas deve ser evitado.

A pressão média que um pneu exerce sobre a superfície do solo é aproximadamente a sua pressão de insuflagem (ARVIDSSON; KELLER, 2007). A pressão de inflagem do pneu também é importante. Na pressão indicada, um pneu tem o mais longo comprimento utilizável e a maior área de contato, o que resulta na maior capacidade de tração e menor pressão de contato no solo (SEIXAS, 1997). Para pressões menores, o pneu sofre uma deflexão excessiva e prejudicial (WILEY et al., 1992).

Lanças (2007) enfatiza que a calibragem correta do pneu diminui em até 20 % o consumo de combustível, havendo uma economia de 7,5 % no tempo consumido para a realização da atividade e diminui em até 80 % a compactação do solo. Segundo Fernandes e Souza (2003), as máquinas usadas na colheita florestal deveriam utilizar pneus com baixa pressão e alta flutuação para atenuar a compactação.

Aust et al. (1993) não encontraram interação entre largura de pneus e densidade do solo. A densidade do solo teve uma variação muito alta, havendo valores de 0,89 a 1,36 Mg.m⁻³, sendo que verificaram dificuldade de relacionar largura de pneus com valores de densidade, porém, pneus estreitos tiveram média de densidade do solo maior.

Bygdén et al. (2003) afirmaram que o uso de máquinas com rodados de semi-esteiras ou esteiras, reduz de forma significativa a compactação e os distúrbios ao solo, permitindo ainda a máquina acessar áreas declivosas, onde o rodado de pneus em certas ocasiões não foi capaz de acessar. Além disso, o uso de tratores com rodados de esteiras, pneus duplos, pneus de maiores dimensões e de baixa pressão interna de inflagem

e alta flutuação e rodados em tandem (FERNANDES; SOUZA, 2003; LIMA et al., 2008), são medidas recomendadas para a minimização dos problemas de compactação nos solos florestais.

Além do uso racional dos maquinários e implementos, é recomendada a adoção de manejos de solo e da matéria orgânica que, não somente minimizem o impacto das operações, mas também agreguem outras vantagens tais como proteger o solo dos impactos da chuva, produzir matéria orgânica, desenvolver agregados, diminuir ou reverter a compactação, melhorar a infiltração de água e assim favorecer o desenvolvimento do sistema radicular (SANCHES, 2000).

A utilização dos resíduos florestais serve como uma alternativa para minimizar o impacto provocado, devido o tráfego das máquinas, na estrutura dos solos sob colheita florestal (SEIXAS et al., 1998). Com a presença de serrapilheira sobre o solo, uma das principais finalidades que este resíduo apresentará será a distribuição das pressões aplicadas, principalmente no processo de extração por arraste de madeira, de tal forma a evitar que a capacidade de suporte de carga do solo seja superada, o que reduziria o risco da compactação e a formação de sulcos pelos rodados das máquinas (McMAHON; EVANSON, 1994).

As camadas de resíduos da colheita de madeira proporcionam uma redução significativa na formação de sulcos e um aumento na capacidade de suporte do solo, em estudo onde avaliou o tráfego de um trator agrícola equipado com grua e carreta sobre camadas de resíduos (10 kg.m^{-2} de casca, galhos e folhas) na colheita de *Eucalyptus grandis*. Neste estudo, concluiu-se que a camada de resíduos reduziu, em média, 56% o nível de compactação, que foi medida pela densidade, até 0,17 m de profundidade do solo (SEIXAS, 2002).

Seixas et al. (1995) detectaram reduções significativas na compactação devido ao tráfego de um forwarder sobre camada de resíduos da colheita florestal. Coberturas de galhos e acículas na proporção de 10 a 20 kg.m^{-2} reduziram em média em 40% o incremento na densidade do solo, se comparado com parcelas sem camada de resíduos.

De acordo com Seixas et al. (1997), a redução média observada no nível de compactação nos tratamentos com cobertura, medida através da densidade em relação ao atingido no tráfego em contato direto com o solo, foi de 56%. Outra alternativa sugerida pelos autores foi trocar os pneus veiculares de caminhão que equiparam a carreta, por pneus propriamente florestais, mais largos e com maior área de contato com o solo.

Brandt (2005) e Braida et al. (2006) demonstraram a necessidade de manter a superfície do solo com cobertura vegetal para dissipar a energia de compactação. Certamente, essa é apenas uma das vantagens da cobertura vegetal, mas outras podem ser citadas, tais como: dissipação da energia da chuva reduzindo as perdas de solo por erosão (BARCELOS et al., 1999; SCHÄFER et al., 2001; CASSOL et al., 2004), ciclagem e disponibilidade de nutrientes (PAVINATO et al., 1994; AITA et al., 2001), maior umidade do solo (COSTA et al., 2003; ALBUQUERQUE et al., 2005), menor oscilação da temperatura durante o dia (COSTA et al., 2003; SILVA et al., 2006d) e aporte de matéria orgânica (BAYER et al., 2004, 2006).

Hamza e Anderson (2005) citam que o aumento do teor de matéria orgânica é importante na redução da densidade do solo prevenindo ou reduzindo a transmissão da compactação para o subsolo de forças externas agindo na superfície do solo, bem como na condução de operações agrícolas e pastejo a uma condição mínima de umidade necessária para realização das operações. Muitas vezes as condições necessárias para evitar a compactação são difíceis de coincidir, pois, algumas delas, como a umidade, por exemplo, dependem das condições climáticas. É necessário, porém, que haja uma programação e organização das atividades para considerar esses fatores descritos anteriormente, evitando, assim, a compactação, problema complexo e de difícil recuperação.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Dados da área experimental

5.1.1 Local

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Guapiarinha, área da Marquesa S/A, empresa do Grupo Orsa, entre os dias 02, 03 e 04 de fevereiro de 2010, sendo que no dia 02/02 realizou-se a coleta de solo da testemunha e 1ª passada (considera-se passada cada vez que o trator Skidder trafegou na área experimental); dia 03/02 da 2ª e 3ª passada; e no dia 04/02 retirou-se a 4ª e 5ª passada do trator Skidder e também as amostras de madeira dos 12 fustes. A fazenda encontra-se no município de Capão Bonito, Sudoeste do Estado de São Paulo, nas coordenadas geográficas de 24° 13' 43,8'' de latitude sul e 48° 17' 33,8'' de longitude oeste e altitude de 823 metros.

5.1.2 Clima

Com base na classificação de Koeppen, Setzer (1946) atribuiu para a região o tipo climático Cfb, sem ocorrência de estiagem. O clima Cfb caracteriza-se como sendo mesotérmico úmido, com a temperatura média do mês mais quente não atingindo a 22°C e precipitação de 1100 a 2000 mm, caracterizando como clima de região serrana (VENTURA, 1964).

5.1.3 Geologia

A formação geológica originária dos solos locais é composta por filitos, quartzo filito e metassiltitos com intercalação subordinadas de micaxistos e quartzitos (IPT, 1981).

5.1.4 Solo

O solo da região do experimento é um Cambissolo Háplico Distrófico A moderado textura argilosa sendo a argila de atividade baixa e baixa saturação por bases ($V < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA (IPT, 1981; EMBRAPA, 2006), porém, a camada de amostras coletadas, é de textura siltosa, provavelmente horizonte C, sendo que esta situação de corte de barranco ocorre de forma localizada nesta fazenda, devido ao relevo ondulado da região.

5.2 Dados do povoamento de Pinus

A espécie florestal utilizada foi o *Pinus elliotti* var. *elliotti*, sendo que a idade do povoamento florestal era de 36 anos. O inventário das árvores foi para o Dap mínimo de 23 cm, Dap máximo de 35,2 e Dap médio de 28,3 cm e altura média das árvores do povoamento florestal de 26,6 metros.

5.3 Forma de extração de madeira na Fazenda Guapiarinha

Nesta fazenda, onde realizou-se o experimento, corta-se as árvores com motosserra e através de um trator agrícola com o guincho TMO[®] retira-se as árvores do interior do talhão (Figura 5A). Após a retirada do interior do talhão, as árvores são acomodadas na lateral do ramal de extração secundário, de onde posteriormente serão arrastadas pelo trator Skidder até o pátio de processamento das árvores e fustes (Figura 5B).

Na margem da estrada principal, localiza-se o pátio de processamento, sendo que neste local ocorrem as etapas de limpeza, toragem e destopamento das árvores e fustes realizadas pelo harvester e depois destas etapas de processamento efetua-se o empilhamento e separação das toras conforme os seguintes comprimentos: 2,20 m (utilizado para celulose); 1,85; 2,50; 3,00 metros (utilizado para serraria). Depois destes procedimentos, o trator agrícola carregador efetua o carregamento dos caminhões “toco” trucados.

Com a carga completa, os caminhões transportam as toras para o pátio principal de madeira, localizado 20 km da Fazenda Guapiarinha, o qual é descarregado. Posteriormente, realiza-se o carregamento de caminhões articulados chamados de caminhões com plataforma e caminhões carretas que serão os responsáveis pela distribuição das toras de maior diâmetro (0,20 m acima) para serrarias da região e as toras com diâmetro menor que 0,20 m serão encaminhadas para a fábrica de celulose da empresa, localizada no município de Nova Campina – SP.

As pontas das árvores que quebram quando são arrastadas e que não serão utilizadas para madeira de serraria e para a fabricação de polpa celulósica, são utilizadas para lenha e são extraídas do interior do talhão com o método do tombo manual até a beirada do ramal secundário e são cortadas com a motosserra em comprimento de 1,0 m, vulgarmente chamado de “métrinho”. Depois de cortadas são extraídas pelo trator “Berço” até a beirada da estrada principal para posterior carregamento dos caminhões “toco”, que irão distribuí-los em olarias, padarias, etc, da região e onde serão utilizados nas fornalhas como lenha.



Figura 5 – (A) Representa o trator agrícola com Guincho TMO[®] arrastando os fustes e árvores do interior do talhão e ajudante do guincho ao centro da foto; (B) Momento em que o trator Skidder arruma os fustes e árvores na beirada do ramal secundário para arrastá-los até o pátio de processamento.

5.4 Trator Skidder utilizado no experimento

O modelo do trator Skidder utilizado foi do fabricante Caterpillar, modelo Cat 545 C, peso total de 19,2 t, 6.032 horas trabalhadas até a data de 04/02/2010. O pneu utilizado foi do modelo Foresty special – crc, fabricante Fyrestone – 35.5L32 – 16 lonas, com bitola de 2622 mm (Figura 6).



Figura 6 – Trator Skidder utilizado pela empresa.

5.5 Tratamentos

O experimento constou de 6 tratamentos, sendo a parcela representada pela interação dos dois tipos de recalques (pneus e fustes) com os 6 tratamentos e a sub-parcela pelas duas camadas (0,00-0,05 e 0,10-0,15 m). A seguir está exposta a Tabela 1 com a descrição de cada tratamento.

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos do experimento.

| TESTEMUNHA | TRATAMENTO 1 | TRATAMENTO 2 | TRATAMENTO 3 | TRATAMENTO 4 | TRATAMENTO 5 |
|---------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições |
| | Recalque Pneu Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque Pneu Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições |
| Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,00-0,05 m 5 Repetições |
| | Recalque fuste Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições | Recalque fuste Camada 0,10-0,15 m 5 Repetições |

TESTEMUNHA = solo sem tráfego de maquinários

TRATAMENTO 1 = corresponde a uma passada do trator Skidder na área experimental;

TRATAMENTO 2 = corresponde a duas passadas do trator Skidder na área experimental;

TRATAMENTO 3 = corresponde a três passadas do trator Skidder na área experimental;

TRATAMENTO 4 = corresponde a quatro passadas do trator Skidder na área experimental;

TRATAMENTO 5 = corresponde a cinco passadas do trator Skidder na área experimental.

5.6 Croqui da área experimental

O croqui da área experimental com os seus respectivos espaçamentos entre as parcelas, entre os pontos das amostras de solo coletadas pelo método do anel volumétrico e a representação da declividade do terreno em relação ao experimento são apresentados a seguir:

área de plantio de Pinus, pois o plantio foi realizado na década de 1970 e a área não apresenta ramais de extração de madeira.

O espaçamento entre cada amostra indeformada de solo foi de 1,10 metros, tanto no recalque do pneu quanto no dos fustes, sendo que no mesmo ponto amostral foram coletadas duas amostras indeformadas, ou seja, nas camadas de 0,00-0,05 e de 0,10-0,15 m em relação à superfície do solo sem serrapilheira. Entre cada parcela, o espaçamento foi de 1,10 metros, com parcelas de 5,50 metros com cinco repetições, sendo que na última parcela considerou-se 1,10 m além do ponto amostral.

O comprimento total do experimento foi de 34,1 metros, sendo que o trator Skidder trafegou no sentido do aclive do terreno. A distância média entre o recalque do pneu e o do fuste foi de 1,31 metros. A determinação da declividade do ramal foi realizada com o uso de um clinômetro, obtendo uma declividade média de 7 %. Para a retirada das amostras utilizou-se como referência régua graduada para medir as camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15 m, para as amostras do anel volumétrico e para a determinação da umidade atual do solo, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Para a coleta das amostras indeformadas de solo, utilizou-se uma ferramenta chamada de “castelo” para introduzir o anel volumétrico no solo nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15 m. Após a retirada do anel volumétrico, retirou-se o excesso de solo com auxílio de um canivete e embrulhou-se a amostra com papel alumínio acondicionando-as na caixa de madeira com revestimento interno de espuma.

Para as amostras de umidade atual, retirou-se torrões com o enxadão, de peso úmido médio de 0,05 kg nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m acondicionando-os em latinhas numeradas. Depois deste procedimento, para manter a umidade as amostras foram mantidas em isopor até a sua posterior pesagem ainda úmido.

No experimento também seria realizado o teste de compactação com o penetrógrafo, porém o aparelho durante os testes antes do experimento em campo funcionou normalmente e no experimento somente as primeiras quatro leituras que funcionaram, depois destas o aparelho não efetuou de forma correta o gráfico com as respectivas camadas compactadas do solo. A seguir estão expostas fotos do local do experimento e de coletas de solo do experimento:



Figura 8 – (A) Foto do recalque da 1ª passada do pneu do trator Skidder; (B) Recalques dos fustes da 1ª passada.

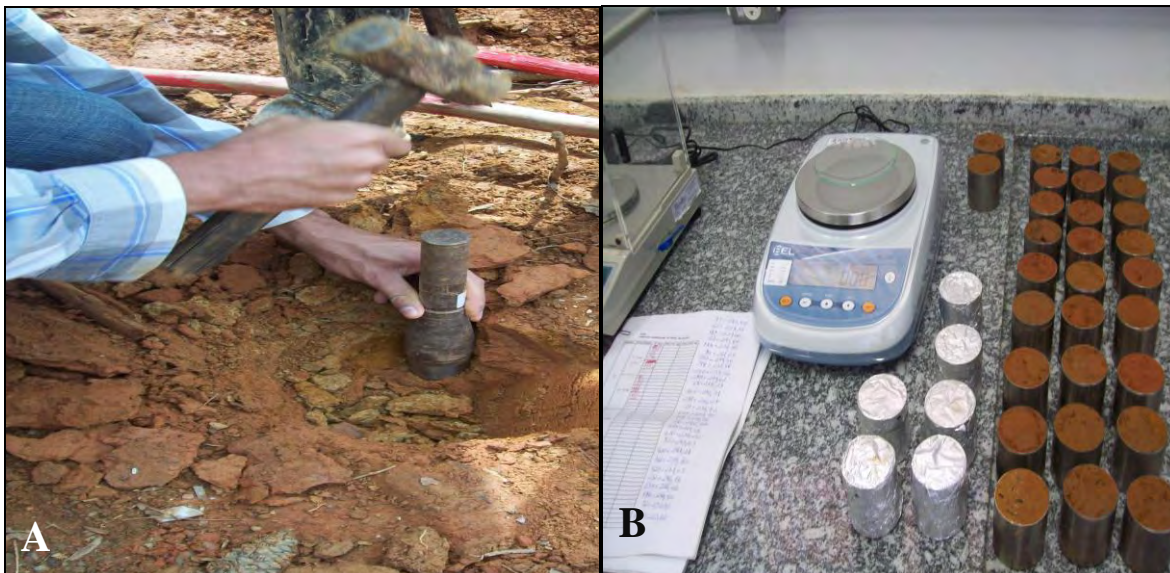


Figura 9 – (A) Momento da coleta de amostra indeformada de solo com o anel volumétrico e o “castelo”; (B) Amostras indeformadas coletadas no experimento.



Figura 10 – (A) Amostras de solo para determinação do teor de água; (B) Foto da área do experimento.

5.8 Análises de solo

5.8.1 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo utilizou-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), sendo as amostras retiradas do recalque do pneu esquerdo do trator Skidder e do fuste arrastado pelo mesmo. As amostras do recalque do pneu foram coletadas do recalque (rastro) do pneu esquerdo devido ao fato de este trafegar no lado do ramal de extração que não recebeu solo para a realização do aterro do ramal. As amostras indeformadas de solo foram secas em estufa com circulação de ar a 105°C até obter peso constante. As dimensões dos anéis volumétricos foram, em média, de 5,27 cm de altura e 4,85 cm de diâmetro e com volume médio de 97,30 cm³. A equação utilizada para o cálculo da densidade do solo foi a seguinte:

$$Ds = \frac{a}{b} \quad (1)$$

sendo que: Ds = densidade do solo (Mg.m⁻³)

a = peso da amostra seca a 105 °C (Mg)

b = volume do anel volumétrico (m³)

5.8.2 Umidade

A determinação da umidade das amostras foi realizada pelo método da umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997). As amostras foram coletadas, posteriormente a passagem do trator Skidder na área, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m e acondicionadas em latas de alumínio numeradas e com peso conhecido. Por parcela coletou-se dois pontos amostrais no recalque do pneu e dois pontos no recalque do fuste espaçados em 2 metros, sendo que o primeiro ponto apresentava espaçamento de 1,20 m do começo da parcela e o segundo ponto apresentava distância de 1,20 metros do final da parcela. Depois de identificadas, as amostras foram transportadas em local impermeável e vedado (no presente experimento utilizou-se isopor) e foram pesadas ainda úmidas, depois secas em estufa entre 105 e 110°C, durante 24 horas. Depois de estabilizado o peso, retirou-se da estufa, deixou-se esfriar e pesou-se a amostra seca. O cálculo para a umidade atual do solo foi o seguinte:

$$Ua(\%) = \frac{100(a-b)}{b} \quad (2)$$

sendo que: Ua = umidade atual do solo (%)

a = peso da amostra úmida (g)

b = peso da amostra seca (g)

5.8.3 Textura

Pela análise granulométrica obteve-se 283 g.kg⁻¹ de argila, 670 g.kg⁻¹ de silte e 47 g.kg⁻¹ de areia, sendo a profundidade média do material inconsolidado, onde foram coletadas as amostras de solo, de 1,80 m de profundidade em relação ao nível natural do terreno. A classificação textural do solo, de acordo com o diagrama triangular simplificado (utilizado pela Embrapa) para a classificação textural do solo, é siltosa, profundidade que corresponde ao horizonte C. As amostras foram coletadas nessa profundidade pelo fato de o sistema de extração da empresa necessitar da realização do corte no terreno. Esse corte no terreno foi realizado para que seja possível aterrar a parte lateral do ramal secundário que se encontra em desnível em relação ao corte realizado no solo. Para a determinação da textura do solo utilizou-se o método da Pipeta (EMBRAPA, 1997).

As fórmulas utilizadas para a determinação da textura do solo segue abaixo:

$$\text{Argila (\%)} = \left[\text{peso da argila + dispersante (A+D)} - \text{peso do dispersante (D)} \right] \times 500 \quad (3)$$

$$\text{Silte (\%)} = \left[\text{peso da argila + silte + dispersante (A+S+D)} - \text{peso da argila (A)} - \text{peso do dispersante (D)} \right] \times 500 \quad (4)$$

$$\text{Areia grossa (\%)} = \text{peso da areia grossa (AG)} \times 10 \quad (5)$$

$$\text{Areia fina (\%)} = 100 - (\% \text{ argila} + \% \text{ silte} + \% \text{ areia grossa}) \quad (6)$$

Nas fórmulas acima, os resultados obtidos foram obtidos em g.kg⁻¹.

5.8.4 Ensaio de Proctor normal

Para a obtenção da curva de compactação do solo, compactou-se cinco corpos de prova, com umidades crescentes. A compactação dos corpos de prova se deu em três camadas, as quais receberam 25 golpes do martelo usado no ensaio de Proctor normal (STANCATI, NOGUEIRA e VILLAR, 1981), determinando-se, a seguir, a

densidade do solo. Para cada camada, uma amostra de solo foi coletada para a determinação da umidade. Com os valores da umidade e da densidade do solo, plotaram-se os pontos nas regressões que melhor se ajustaram aos pontos determinados em laboratório. No ponto de máximo da função obtiveram-se a densidade do solo máxima ($D_{sm\acute{a}x}$) e a umidade ótica ($U_{\acute{o}t}$) de compactação através das expressões $D_{sm\acute{a}x} = - b/2a$ e $U_{\acute{o}t} = - (b^2 - 4ac)/4a$ (IEZZI et al., 1978), em que a, b e c são os coeficientes de ajustes das equações.

No ensaio de compactação de Proctor normal, realizado com o solo do experimento, obteve-se o ponto de umidade ótica em torno de 33 % de teor de água, o qual demonstra que com este teor de umidade no Cambissolo Háplico ocorrerá o máximo de compactação, e após essa porcentagem de umidade haverá a tendência de diminuição da compactação do solo (Figura 11). Em campo foi observado o que foi encontrado no ensaio em laboratório, pois quando o solo estava com umidade acima do ponto de umidade ótica, o trator Skidder trafegava no ramal de extração de madeira e o solo apresentava plasticidade alta, ocorrendo a deformação do solo com a passada do trator Skidder e posteriormente o solo deformado retornava a sua posição de origem. Este fato demonstra que o Cambissolo Háplico, quando em porcentagem de umidade acima do ponto de umidade ótica de compactação, sofrerá uma deformação momentânea e posteriormente retornará ao estado original de estruturação física.

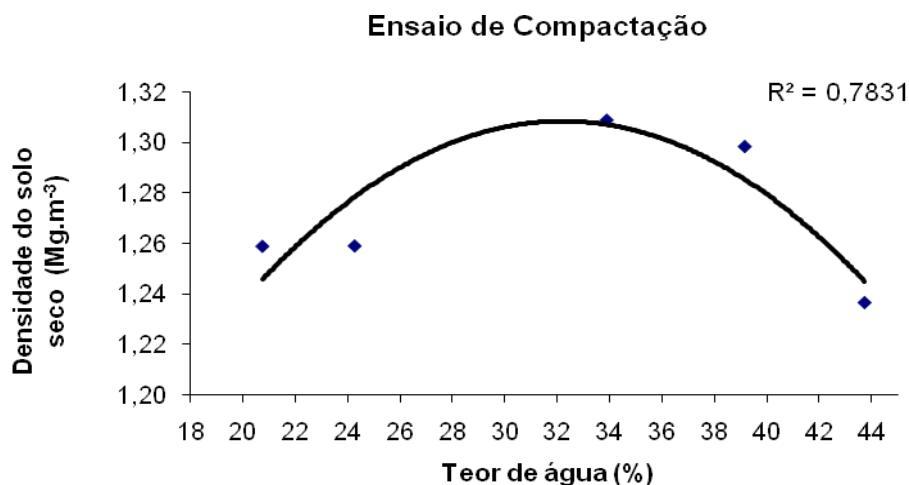


Figura 11 – Curva de compactação do Cambissolo Háplico, sendo que o solo utilizado encontrava-se a 1,80 m de profundidade.

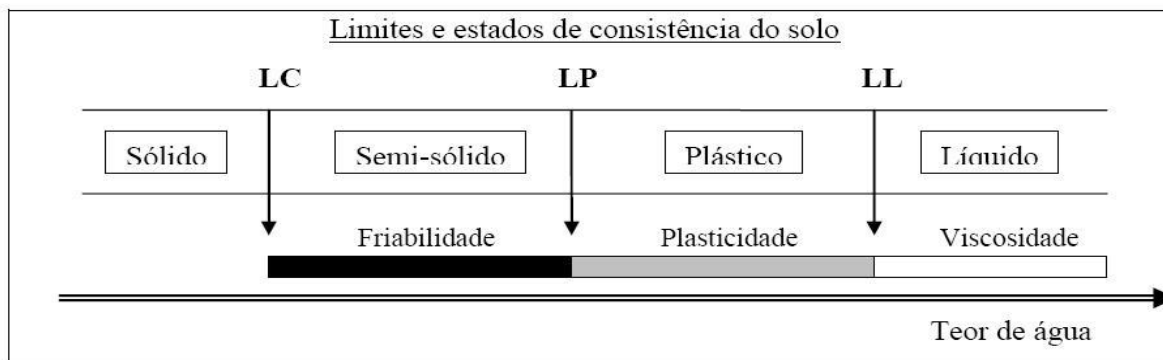
A compactação do solo será variável conforme o tipo de solo, pois cada solo tem uma textura e tamanho de partículas, fato demonstrado para o Cambissolo estudado, pois a 5ª passada de arraste de árvores e fustes na área experimental foi com teor de água de 39,62% para o recalque do pneu (Tabela 8) e 41,68% para o recalque do fuste (Tabela 9) e onde ocorreu o maior incremento de compactação em relação a passada do trator Skidder, para a camada de 0,00-0,10 m, onde houve a maior influencia da compactação do solo.

Zhang et al. (1997) avaliaram a densidade máxima pelo teste de Proctor normal em três solos; arenoso (855 g.kg⁻¹ de areia, 100 g.kg⁻¹ de silte e 45 g.kg⁻¹ de argila), siltoso (158 g.kg⁻¹ de areia, 663 g.kg⁻¹ de silte e 179 g.kg⁻¹ de argila) e argiloso (125 g.kg⁻¹ de areia, 359 g.kg⁻¹ de silte e 516 g.kg⁻¹ de argila) e concluíram que quanto mais susceptível à compactação for o solo, mais efetivo será o efeito da incorporação da matéria orgânica em reduzir a compactabilidade do solo.

A matéria orgânica ocupa uma área superficial específica variando de 800 a 900 m².g⁻¹ (MEURER et al., 2006) e uma capacidade de troca catiônica (CTC) que pode chegar a 1.400 cmolc.kg⁻¹ (CANELLAS et al., 1999), com uma capacidade de retenção de água maior que a da areia, cuja área superficial específica é menor que 0,10 m².g⁻¹ e a CTC é praticamente nula. Dessa forma, a matéria orgânica acaba retendo uma quantidade maior de água que a areia, ficando a água concentrada próximo às partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia, enquanto, no solo argiloso, as diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais da fração argila são menores. Além disso, teoricamente, nos solos argilosos, a interação entre fração mineral e orgânica é maior, resultando em menor disponibilidade de matéria orgânica para interagir com a água do solo (BRAIDA, 2004). A presença de matéria orgânica influencia muito na compactação do solo, devido ao fato de agir como dispersora de pressões impostas por tráfego de maquinários sobre o solo. Devido ao fato de apresentar área superficial específica grande, irá amortecer as pressões impostas pelos mais variados maquinários utilizados nos tratamentos culturais e na colheita.

5.8.5 Limites de consistência do solo

Para a determinação dos limites de Atterberg o solo coletado foi secado ao ar livre. Para se determinar o limite de liquidez utilizou-se o aparelho de Casagrande, onde limite de liquidez é o teor de umidade presente na amostra de solo correspondente ao número de 25 quedas no aparelho, necessárias para que o fundo de uma fenda previamente aberta se feche em uma extensão de 1,2 e 1,5 cm. Para se obter o valor para 25 quedas, ajustou-se uma equação correspondente aos pontos de três repetições, obtendo-se assim o valor de umidade correspondente; o limite de plasticidade é o teor de umidade quando se consegue moldar um cilindro de aproximadamente 3 a 4 mm de espessura (SOWERS, 1965). O limite de contração (LC) foi determinado de acordo com Bowles (1986). Os limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC) estão mostrados na Figura 12.



Fonte: Limites de Consistência de Atterberg (1911) adaptado por Silva (2002).

Figura 12 – Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC).

5.8.5.1 Limite de liquidez

Para o solo coletado a 1,80 m de profundidade, obteve-se o limite de liquidez com umidade de 49 %, ou seja, a partir desta porcentagem de umidade, devido à evaporação da água, o solo solidifica e perde a capacidade de fluir, porém pode ser

moldado e conservar sua forma. Na equação para determinação do teor de água, o valor do Log dos golpes obtido foi de 1,40 (Figura 13).

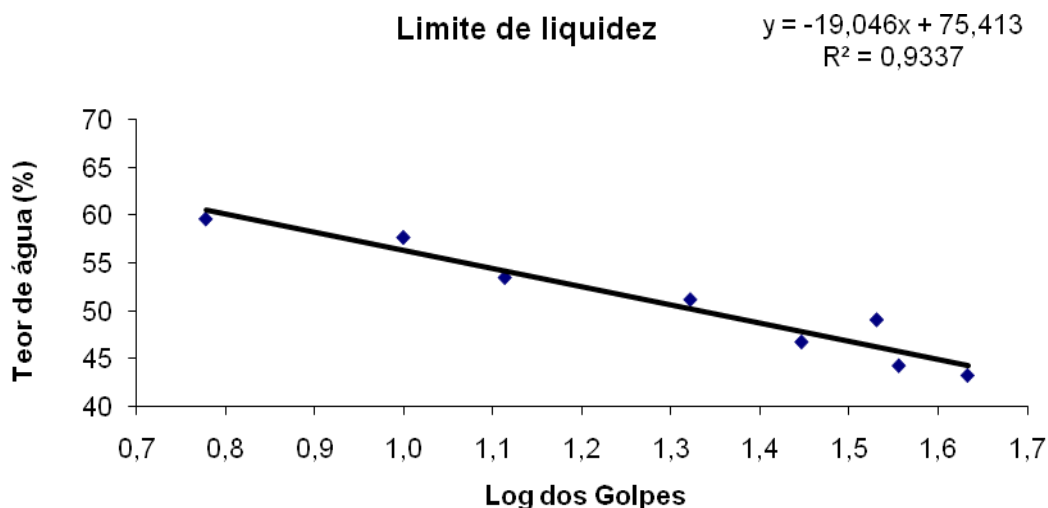


Figura 13 – Diferentes teores de água para determinação do Limite de Liquidez.

Na determinação do Limite de Liquidez, quando o solo estava com umidade acima de 49 %, o número de golpes para que ocorresse a junção das duas amostras de solo utilizadas no aparelho de Casagrande era menor quando a umidade do solo encontrava-se superior ao Limite de Liquidez.

5.8.5.2 Limite de plasticidade

Para o Limite de plasticidade encontrou-se a umidade de 37 %, sendo que quando o solo encontrava-se com umidade superior ao encontrado em laboratório, o tráfego de maquinários ocasionava deformação no solo, porém, a compactação do solo era menos acentuada quando a umidade estava acima do limite de plasticidade. As deformações ocasionadas pelo tráfego de maquinários, quando ocorria sob condições de umidade acima de 37 %, eram elásticas, ou seja, momentaneamente ocorria a deformação do solo e após a passagem do maquinário, a estrutura retornava ao estado original.

5.8.5.3 Limite de contração

Para a contração do solo obteve-se um valor de 33 % de umidade, demonstrando assim, o que visualizava-se em campo, ou seja, a alta contração do solo durante o tráfego de maquinários quando a porcentagem de umidade do solo era superior ao Limite de contração. Este alto valor de contração do solo, apresenta vantagem em relação a desestruturação do solo, pois os tratos culturais, realizados durante o ciclo da cultura e na etapa de colheita, se forem efetuados com umidade do solo superior ao Limite de contração, podem ocasionar uma menor deformação prejudicial e compactação do solo.

5.9 Densidade da madeira

Para determinar a densidade da madeira foi utilizado o método do máximo teor de umidade, na qual utiliza-se o peso saturado das amostras em forma de disco de madeira, peso seco em estufa do disco e o peso do disco imerso em água.

As amostras de madeira coletadas tinham formato de disco, pois realizou-se o corte com a motosserra dos fustes a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura total (PEREIRA, 1986), com uma espessura média de 0,05 m. Após o corte, cada amostra foi devidamente identificada. Coletou-se discos de 12 fustes, em cada fuste retirou-se cinco discos nas alturas citadas anteriormente. Depois da identificação das amostras no campo, os discos foram mergulhados em água presente em uma caixa d'água pelo período de 13 de fevereiro até 06 de abril.

Os discos foram identificados com letras, na seqüência de A até E, sendo que a letra A representa a altura de 0% do fuste, B a altura de 25%, C a altura de 50%, D a altura de 75% e a letra E representa a de 100%.

A água da caixa d'água foi trocada uma vez por semana para ser retirada a água suja que acumulava a resina presente na composição da madeira e outros resíduos dos discos que foram substituídos nos vasos resiníferos pela água. Esse procedimento foi realizado para completa saturação dos discos com água e assim ocorrer a retirada da resina presente nos vasos resiníferos da madeira, para posteriormente, cada

amostra ser pesada saturada, sendo considerado, assim, somente o volume de madeira com os vasos saturados com água.

Após a saturação dos discos de madeira, retiraram-se as amostras da água, secou-se o excesso de água e realizou-se a pesagem dos discos saturados em balança de precisão. Na mesma balança, o disco de madeira ficava suspenso por um fio de náilon onde era submergido totalmente em água para determinar o peso imerso em água. Depois destas determinações, os discos foram secos em estufa a 105°C até peso constante.

A fórmula para determinação da densidade da madeira, proposta pela ASSOCIAÇÃO..., (1974) através do método da balança hidrostática segue abaixo:

$$DB = \frac{PAS}{PAM - PAI} \quad (7)$$

onde: DB = densidade básica da amostra (g.cm^{-3});

PAS = peso da amostra absolutamente seca (g);

PAM = peso da amostra saturada (g);

PAI = peso imerso (g);

Para estimar a densidade na situação de ausência de retirada de discos das diferentes alturas do fuste, a média do valor da densidade foi calculada utilizando-se os valores da densidade real obtida em condições de laboratório. Na amostra a 0% da altura do fuste, utilizou-se os discos com circunferências semelhantes para a estimativa da densidade das amostras. Exemplificando, se a circunferência de um disco fosse de 0,55 m, consideraram-se todas as amostras que estavam com circunferência no intervalo de 0,50 a 0,60 m. Isto foi feito com o intuito de diminuir efeitos de densidades diferentes, bem como valores tendenciosos.

Para os valores de 25, 50, 75 e 100% da altura, utilizou-se os valores obtidos em laboratório com as alturas próximas a altura do valor da circunferência. Exemplificando, se o fuste apresentou uma altura de 7,5 metros, consideraram-se os valores das amostras de laboratório entre as alturas de 6,5 a 8,5 metros, ou seja, 1 metro acima e 1

metro abaixo. Portanto, a densidade foi estimada por meio da média dos valores da densidade calculada em laboratório dentro do intervalo de altura do fuste medido a campo. Isto foi feito com o intuito de evitar a retirada de muitos discos de fuste a campo, além do fato de coibir o transtorno de transportá-los para condições de laboratório. Essa técnica de estimar a densidade do fuste foi baseada no estudo de Panshin e De Zeeuw (1970), que comentaram que o gênero *Pinus* apresenta decréscimo uniforme da densidade da madeira conforme a altura da árvore aumenta.

5.10 Volume de madeira

Em cada passada do trator Skidder foi calculado o peso arrastado de madeira. Com os dados da densidade da madeira, analisado em laboratório com as amostras de discos coletados durante o experimento, estimou-se os pesos das toras e conseqüentemente o peso de cada fuste e, assim, o peso total dos fustes arrastados em cada passada.

Então, após a obtenção dos valores das densidades, com os valores da cubagem dos fustes calculou-se o volume de madeira com a fórmula de Smalian, a qual segue abaixo:

$$V = \frac{A+a}{2} L \quad (8)$$

sendo que: V= volume de madeira (m³)

A= área secção maior (m²)

a= área secção menor (m²)

L= comprimento da tora (m)

5.11 Análise da densidade da madeira

Existem importantes variações nas propriedades físico-mecânicas entre as árvores, mesmo quando são originadas do mesmo clone e do mesmo sítio. Isso se deve à característica biológica das árvores, que possuem fontes naturais de variação que, muitas vezes, não podem ser eliminadas. Também tem a própria variação dos fatores que compõem o sítio que irá afetar o desenvolvimento da árvore e, conseqüentemente, a qualidade da madeira produzida (EVANS et al., 2000; PANSHIN, ZEEUW, 1980; TOMAZELLO FILHO, 1985), o que pode explicar a variação da densidade da madeira dos fustes arrastados pelo trator Skidder no experimento (Tabela 2).

Segundo Kollmann e Côté (1968), as variações na densidade da madeira são devidas principalmente a diferenças na estrutura e, em menor grau, à presença de constituintes estranhos. A estrutura da madeira é caracterizada pela soma proporcional de diferentes tipos celulares, como as fibras, traqueídeos, vasos, canais resiníferos, raios e por suas dimensões, especialmente a espessura das paredes celulares. Tendências hereditárias, influências fisiológicas e mecânicas, assim como fatores ambientais (solo, calor, precipitação, ventos etc) afetam a estrutura da madeira e, conseqüentemente, sua densidade. Também a durabilidade natural da madeira pode ser influenciada pela densidade. Geralmente, madeiras de maior densidade apresentam estrutura mais “fechada” e, freqüentemente, ocorre impregnação de substâncias como alcalóides e taninos nas paredes das células, tornando-as mais resistentes à ação de agentes deteriorantes.

A seguir é apresentada a tabela dos valores de densidade das amostras que foram coletadas no local do experimento, sendo que estas amostras foram utilizadas como parâmetro para a estimativa das densidades dos fustes que tiveram somente os dados de circunferência nas alturas a 0, 25, 50, 75 e 100% (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores de densidade da madeira dos discos coletados a campo.

| Número | Densidade das amostras de madeira (g.cm ⁻³) | | | | | Média |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D | E | |
| 31 | 0,540 | 0,502 | 0,484 | 0,569 | 0,444 | 0,508 |
| 41 | 0,513 | 0,513 | 0,477 | 0,439 | 0,426 | 0,474 |
| 42 | 0,534 | 0,464 | 0,462 | 0,451 | 0,456 | 0,470 |
| 43 | 0,494 | 0,506 | 0,478 | 0,464 | 0,435 | 0,476 |
| 46 | 0,556 | 0,498 | 0,531 | 0,505 | 0,501 | 0,518 |
| 47 | 0,518 | 0,527 | 0,485 | 0,449 | 0,421 | 0,480 |
| 48 | 0,415 | 0,439 | 0,496 | 0,419 | 0,397 | 0,433 |
| 51 | 0,548 | 0,543 | 0,502 | 0,499 | 0,516 | 0,522 |
| 52 | 0,534 | 0,516 | 0,468 | 0,444 | 0,406 | 0,474 |
| 53 | 0,527 | 0,482 | 0,445 | 0,430 | 0,388 | 0,454 |
| 54 | 0,525 | 0,475 | 0,570 | 0,499 | 0,476 | 0,509 |
| 55 | 0,497 | 0,538 | 0,502 | 0,509 | 0,483 | 0,506 |

Em cada passada do trator Skidder retirou-se amostras indeformadas de solo no recalque do pneu e do fuste. No recalque do fuste coletou-se as amostras indeformadas em somente um recalque em relação aos demais recalques dos fustes arrastados por passada. A escolha de cada recalque do fuste para a retirada das amostras indeformadas de cada passada do trator Skidder foi definida no momento do arraste dos fustes, sendo que selecionou-se o recalque com maior profundidade e identificou-se o fuste que o realizou. Os fustes que foram utilizados para a coleta de amostras indeformadas de solo em seu recalque, foram os fustes número 3, 4, 3, 1 e 2 para as passadas 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 – Dados de cada fuste arrastado durante o experimento.

| Passadas | Número do Fuste | Comprimento do Fuste (m) | Volume de Madeira (m ³) | Massa do Fuste (kg) |
|----------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 1^a | 1 | 22,1 | 0,34 | 160,01 |
| | 2 | 10,2 | 0,25 | 127,45 |
| | 3 | 24,3 | 1,28 | 640,29 |
| | 4 | 25,0 | 0,31 | 148,90 |
| | 5 | 22,8 | 0,89 | 440,53 |
| | 6 | 23,4 | 1,14 | 561,53 |
| 2^a | 1 | 18,6 | 1,49 | 771,24 |
| | 2 | 21,2 | 1,33 | 671,48 |
| | 3 | 16,5 | 1,44 | 718,98 |
| | 4 | 20,2 | 1,25 | 628,46 |
| 3^a | 1 | 19,1 | 1,20 | 628,16 |
| | 2 | 18,5 | 0,64 | 319,13 |
| | 3 | 22,7 | 1,40 | 709,58 |
| | 4 | 14,8 | 1,08 | 557,20 |
| | 5 | 20,2 | 0,90 | 453,18 |
| | 6 | 16,9 | 1,14 | 561,52 |
| 4^a | 1 | 24,4 | 0,99 | 491,23 |
| | 2 | 20,0 | 0,74 | 360,61 |
| | 3 | 9,2 | 0,56 | 273,83 |
| | 4 | 20,2 | 0,92 | 459,01 |
| | 5 | 21,5(a); 16,1(b) | 3,02 (a + b) | 1495,30 |
| | 6 | 21,0 | 0,75 | 399,65 |
| | 7 | 23,2 | 1,09 | 551,79 |
| | 8 | 23,0 | 0,43 | 190,50 |
| 5^a | 1 | 20,6 | 0,74 | 394,02 |
| | 2 | 25,2 | 1,49 | 743,94 |
| | 3 | 21,5 | 0,60 | 290,77 |
| | 4 | 18,0 | 0,44 | 230,13 |
| | 5 | 14,0 | 1,43 | 730,56 |

No fuste número 5 da 4^a Passada havia uma bifurcação, sendo que se dividiu em “a” e “b”, a bifurcação “a” era a bifurcação mais longa e a bifurcação “b” era a menor, sendo que a bifurcação do fuste encontrava-se na altura de 4,5 metros.

Através da estimativa da densidade da madeira de Pinus, calculou-se o volume de madeira de cada fuste e também a massa arrastada em cada passada do trator Skidder, sendo que para estes valores desconsiderou-se o volume de água presente nos fustes (Tabela 4).

Tabela 4 – Dados do número de fustes arrastados por passada e massa total arrastada estimada pela densidade da madeira, em toneladas.

| <i>Passadas</i> | <i>Numero de Fustes</i> | <i>Massa Total (t)</i> |
|----------------------|-------------------------|------------------------|
| <i>1^a</i> | 6 | 2,08 |
| <i>2^a</i> | 4 | 2,79 |
| <i>3^a</i> | 6 | 3,23 |
| <i>4^a</i> | 8 | 4,22 |
| <i>5^a</i> | 5 | 2,39 |

Com base nestes dados, de densidade da madeira para cálculo da massa de cada fuste e conseqüentemente a massa total arrastada por passada, utilizou-se o valor da massa de cada passada para correlacioná-la juntamente com o número do fuste arrastado por passada, como foi demonstrado na 5^a passada do experimento, onde o fuste número 2 com massa de 743,94 kg ocasionou compactação de 1,38 Mg.m⁻³.

Por meio dos dados da Tabela 4, poderiam ser calculadas as pressões exercidas de cada fuste sobre o solo, no entanto, seria necessário medir o comprimento da ponta do fuste que está apoiado sobre o solo, calculando-se a pressão aplicada no recalque no momento do arraste. Contudo, deve-se levar em consideração a distribuição da massa total na ponta do fuste, pois a maior porcentagem da massa estará apoiada na pinça do trator Skidder. A medição do comprimento da ponta do fuste não foi realizada pela dificuldade no momento da passada do trator Skidder arrastando os fustes.

5.12 Análise estatística

O delineamento estatístico utilizado no experimento foi o inteiramente casualizado em parcela sub-subdividida com cinco repetições, sendo que todas as variáveis foram submetidas a análise de variância com desdobramento das somas de quadrado dos efeitos em regressão linear simples. Realizou-se o teste de médias pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% de probabilidade, utilizando-se o sistema para análise estatística Statistical Analysis System (SAS).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Densidade do solo

Avaliou-se as médias das densidades do solo do recalque (vulgarmente chamado de rastro) do pneu e fuste obtidas em interações duplas, ou seja, entre repetições e recalques; recalque e tratamentos; recalque e camada; tratamento e camada. Realizou-se interação tripla, entre as repetições, recalques e tratamentos; e recalque, tratamentos e camada. Foi avaliada também a interação entre os dois recalques (pneus e fustes), tratamentos (testemunha e 5 passadas) e as duas camadas (0,00-0,05 e 0,10-0,15 m), sendo que os resultados obtidos destas interações estão apresentados na Tabela 6.

Entre as interações estudadas, a interação tripla, entre o recalque do pneu e do fuste, tratamentos (testemunha + 5 passadas) e as duas camadas (0,00-0,05 e 0,10-0,15 m); a interação entre os recalques e as profundidades e a variável recalque do pneu e dos fustes não foram significativas a 5% de probabilidade pelo teste F (Tabela 5). Para as variáveis tratamentos (testemunha + 5 passadas) houve diferença significativa, permitindo constatar que o tráfego de máquinas e fuste nas áreas de colheita promovem a compactação do solo.

A análise das repetições demonstrou que entre as repetições ocorreu diferença significativa a 5% de probabilidade e o coeficiente de variação foi de 1,96 %, demonstrando, desta forma, que os valores obtidos apresentaram baixa variação entre o menor e o maior valor da média de compactação do solo (Tabela 5).

Tabela 5 – Dados das repetições e coeficiente de variação.

| | <i>GL</i> | <i>SQ</i> | <i>QM</i> | <i>F</i> | <i>Pr > F</i> |
|------------|-----------|------------|------------|----------|------------------|
| Repetições | 4 | 0,02475500 | 0,00618875 | 10,21 | < 0,0005* |
| CV (%) | 1,96 | | | | |

*Significativo a 5% de probabilidade

Na interação entre os recalques e os tratamentos houve diferença significativa a 5% de probabilidade (Tabela 6), sendo que com 5 passadas sobre a mesma área, o recalque do pneu apresentou uma menor compactação ($1,34 \text{ Mg.m}^{-3}$) quando comparado com o do fuste ($1,38 \text{ Mg.m}^{-3}$). Este fato pode ser explicado pela menor área de contato do fuste com o solo, já o pneu possui uma maior área de contato com o solo e desta forma ocorre uma melhor distribuição do peso da máquina e da carga sobre o solo. Na interação entre os tratamentos e as camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15 m, nas quais foi analisada a compactação do solo por passada, ocorreu diferença significativa, bem como para a variável profundidade (Tabela 6).

Tabela 6 – Análise de variância entre os dados dos recalques do pneu e dos fustes, das cinco passadas mais a testemunha e as camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15 m.

| Variáveis | <i>GL</i> | <i>SQ</i> | <i>QM</i> | <i>F</i> | <i>Pr > F</i> |
|---------------------|-----------|------------|------------|----------|----------------------|
| recalques (rec.) | 1 | 0,00630750 | 0,00630750 | 10,40 | 0,0023 ^{NS} |
| rep. x rec. | 4 | 0,00113833 | 0,00028458 | 0,47 | 0,7579 ^{NS} |
| tratamentos (trat.) | 5 | 0,41245417 | 0,08249083 | 136,07 | <0,0005* |
| rec. x trat. | 5 | 0,04182750 | 0,00836550 | 13,80 | <0,0005* |
| rep. x rec. x trat. | 40 | 0,02132667 | 0,00053317 | 0,88 | 0,6597 ^{NS} |
| camadas (cam.) | 1 | 0,18802083 | 0,18802083 | 310,14 | <0,0005* |
| rec. x cam. | 1 | 0,00080083 | 0,00080083 | 1,32 | 0,2561 ^{NS} |
| trat. x cam. | 5 | 0,03095417 | 0,00619083 | 10,21 | <0,0005* |
| rec. x cam. x prof. | 5 | 0,00677417 | 0,00135483 | 2,23 | 0,0659 ^{NS} |
| Resíduo | 48 | 0,0291 | 0,00060625 | | |

*Significativo a 5% de probabilidade, ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade.

Na análise comparativa das médias de densidade do solo, nos dois recalques, nas duas camadas estudadas, ocorreu diferença significativa com o teste de Tukey a 5% de probabilidade, demonstrando que a camada superficial do Cambissolo Háplico, de 0,00 a 0,05 m de profundidade, sofre maior influência do tráfego do trator Skidder e do arraste dos fustes (Tabela 7).

Tabela 7 – Média das densidades do solo, em ambos os recalques, nas duas camadas estudadas.

| <i>Camadas (m)</i> | <i>Média das densidades (Mg.m⁻³)</i> |
|--------------------|---|
| <i>0,00-0,05</i> | 1,30a ¹ |
| <i>0,10-0,15</i> | 1,22b |

¹ Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para a variável analisada número de passadas, houve um acréscimo de 16,24% da compactação do solo, quando se compara a testemunha com a 5ª passada, sendo que a densidade do solo, encontrada no experimento, na testemunha foi de 1,17 Mg.m⁻³, aumentando para 1,36 Mg.m⁻³ na 5ª passada (Figura 14). Beltrame e Taylor (1980) citam que a mecanização tem sido a responsável pela deterioração mais rápida das condições físicas do solo, pois o tráfego excessivo, sem o controle das condições adequadas do solo para o tráfego, contribui para a compactação ocasionada por forças mecânicas. Este fato pode haver tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo, sendo que Silva et al., (2000a); Lima et al., (2006); Veiga et al., (2007) comentam que pode ocorrer quando a carga aplicada ao solo for superior à capacidade de suporte do solo.

Embora a densidade do solo seja a medida quantitativa mais direta no diagnóstico da compactação, a granulometria do solo exerce forte influência sobre esse atributo, limitando, assim, a escolha de um valor absoluto que possa ser utilizado como referência para solos de diferentes classes texturais (CAMARGO; ALLEONI, 1997; REICHERT et al., 2009).

Conforme Reichert et al. (2003), solos com conteúdo de argila de 250 g.kg^{-1} , o valor crítico de densidade está entre $1,4$ e $1,5 \text{ Mg.m}^{-3}$. Corsini e Ferraudo (1999) consideram o valor crítico ao desenvolvimento radicular das plantas, está em torno de $1,75 \text{ Mg.m}^{-3}$ para solos arenosos. Baseado nestes dados, a compactação obtida em cada passada durante o experimento está dentro do limite que não afetará o crescimento das plantas, pois o maior nível de compactação foi de $1,43 \text{ Mg.m}^{-3}$, que ocorreu nas médias de compactações da 5ª passada na camada de $0,00-0,05 \text{ m}$ (Figura 17), pois o solo estudado apresentou 283 g.kg^{-1} de argila.

Porém, a dificuldade para a definição e, conseqüentemente, para a adoção de um valor crítico para propriedades e atributos de solo reside no fato de que esses não são determinantes diretos do crescimento das plantas, diferentemente do ar, água e temperatura, que influenciam diretamente o crescimento das plantas. Além disso, as propriedades e atributos do solo atuam de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento e, assim, a definição de um valor específico para uma propriedade pode não ter significado, quando analisado isoladamente (REICHERT et al., 2003). Outra dificuldade é que solos (BRAIDA, 2004; SILVA et al., 2006b,c), culturas (SILVA et al., 2006a; FOLONI et al., 2006) e até mesmo os cultivares dentro de uma mesma espécie (GUIMARÃES et al., 2002; BEUTLER et al., 2006) respondem diferentemente aos níveis de compactação do solo.

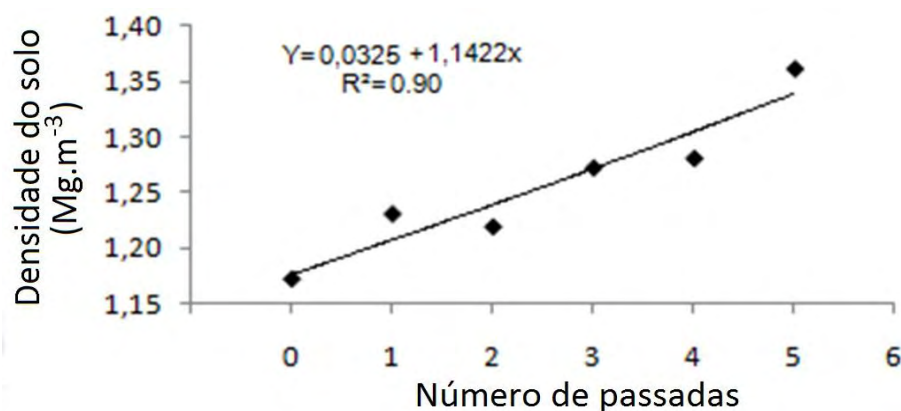


Figura 14 – Média dos valores de densidade do solo, das duas camadas e dois recalques, em relação à variável número de passadas.

Os valores médios de densidade do solo, nas duas camadas, em relação a interação entre os recalques e o número de passadas, permite observar que para a variável recalque do pneu quando comparado com o número de passadas, ocorreu um aumento gradativo da compactação do solo (Figura 15). Curi et al. (1993) definiram compactação como sendo uma diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, causando um rearranjo mais denso das partículas do solo e conseqüente redução da macroporosidade. O valor médio de compactação do solo aumentou de $1,17 \text{ Mg.m}^{-3}$ para $1,33 \text{ Mg.m}^{-3}$, tendo um aumento de 14,53% na densidade do solo. O aumento da densidade do solo foi praticamente linear ao tráfego do trator Skidder no ramal de extração de madeira (Figura 15). A mecanização, quer seja de áreas agrícolas ou florestais, é a principal causa da compactação dos solos, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego (REICHERT et al., 2007), determinando as relações entre ar, água e temperatura do solo, que influenciam diretamente na germinação, a brotação e a emergência das plantas, no crescimento e no desenvolvimento das raízes e plantas (LETEY, 1985; SILVA et al., 1994).

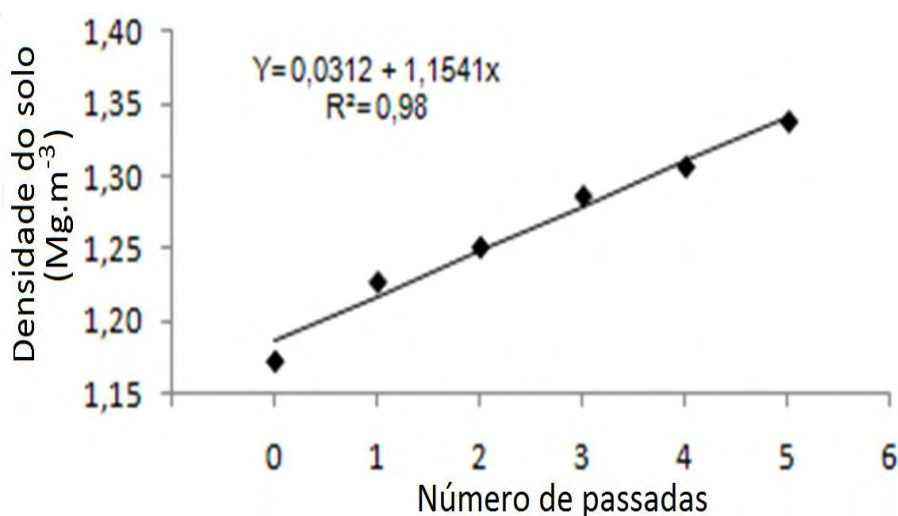


Figura 15 – Média dos valores de densidade do solo, nas duas camadas, da interação entre os recalques e o número de passadas, para a variável recalque do pneu.

No recalque do fuste houve um aumento da compactação de $1,17 \text{ Mg.m}^{-3}$ na testemunha para $1,24 \text{ Mg.m}^{-3}$ na 1ª passada, apresentando um aumento de 5,98%

na densidade média do solo, porém na 2ª passada houve uma compactação de $1,19 \text{ Mg.m}^{-3}$, isto pode ter ocorrido pelo fato da presença de uma concentração de matéria orgânica no local e/ou a densidade do solo neste local ter sido inferior a testemunha antes do tráfego de fustes. Porém, a concentração média de matéria orgânica obtida através de análise química do solo apresentou o valor de 12 g.dm^{-3} , nível considerado baixo, possibilitando maiores ocorrências de compactação no solo. Desta forma, esses valores representam que houve uma menor compactação do solo nesta passada, porém, pode haver uma falsa representação da realidade do local (Figura 16).

Outra explicação para a diminuição da compactação na 2ª passada, pode ser pela ocorrência de uma chuva durante o período noturno, apesar de na portaria da fazenda não ter registro de chuva nesse dia, havia sinal de enxurrada no local do experimento e no período da manhã o céu estava nublado, e os funcionários do turno da noite comentaram que na área tinha ocorrido precipitação. Na região muitas vezes isso ocorre, em um local está chovendo e em locais próximos, com distância de 4 ou 5 km não chove, como foi o caso deste dia, onde a portaria da fazenda Guapiarinha se encontra a 6 km do local do experimento.

A presença de matéria orgânica como minimizadora dos efeitos da compactação é explicada por Cruz et al.(2003), os quais comentam que a estabilidade da estrutura depende da matéria orgânica, verificando-se menor risco de degradação estrutural e de compactação em solos com maiores teores de carbono orgânico, como acontece em áreas de plantio direto.

Na 3ª e 4ª passadas a compactação foi igual a $1,26 \text{ Mg.m}^{-3}$, o que pode ser explicado pelos mesmos motivos citados acima, ou seja, a concentração de matéria orgânica do solo ou a densidade do solo anterior ao tráfego. Na 5ª passada ocorreu compactação de $1,38 \text{ Mg.m}^{-3}$, sendo que em relação a testemunha ocorreu um aumento de 17,95% na densidade média do solo neste recalque. O coeficiente de determinação (R^2) da interação recalque do fuste com as camadas foi de 0,72, devido ao fato de os valores da 2ª, 3ª e 4ª passadas não estarem em crescimento linear em relação ao valor médio de densidade da 1ª passada (Figura 16).

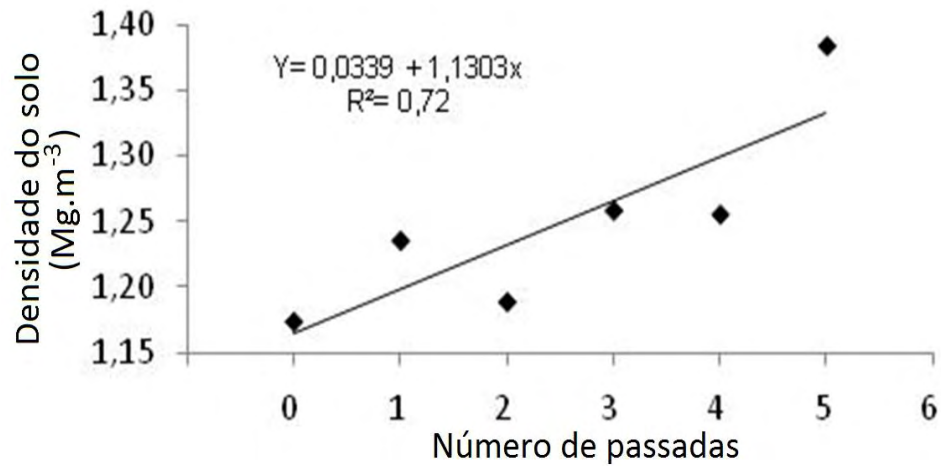


Figura 16 – Média dos valores de densidade do solo, nas duas camadas, da interação entre os recalques e o número de passadas, para o recalque dos fustes.

Para os valores médios de densidade do solo em relação a interação camadas e número de passadas, obteve-se para a camada de 0,00-0,05 m, a média de densidade dos recalques do pneu e do fuste de 1,27 Mg.m⁻³ na 1ª passada, apresentando um acréscimo de 8,55 % na densidade em relação a testemunha. Porém, na 2ª passada o valor diminuiu para 1,23 Mg.m⁻³, fato que pode ser explicado pela presença de matéria orgânica no local de tráfego ou pelo fato de a densidade no local de coleta das amostras indeformadas serem menor que 1,17 Mg.m⁻³, como foi explicado para os valores médios da 2ª, 3ª, 4ª passadas dos valores da Figura 14. Na 3ª passada ocorreu compactação de 1,31 Mg.m⁻³, na 4ª passada foi de 1,33 Mg.m⁻³ e na 5ª passada 1,43 Mg.m⁻³, tendo assim um valor de $R^2=0,83$ (Figura 17), sendo que a compactação mais pronunciada no experimento, causada pelo trator Skidder no experimento, ocorreu na camada superficial do solo, entre 0,00 e 0,05 m de profundidade.

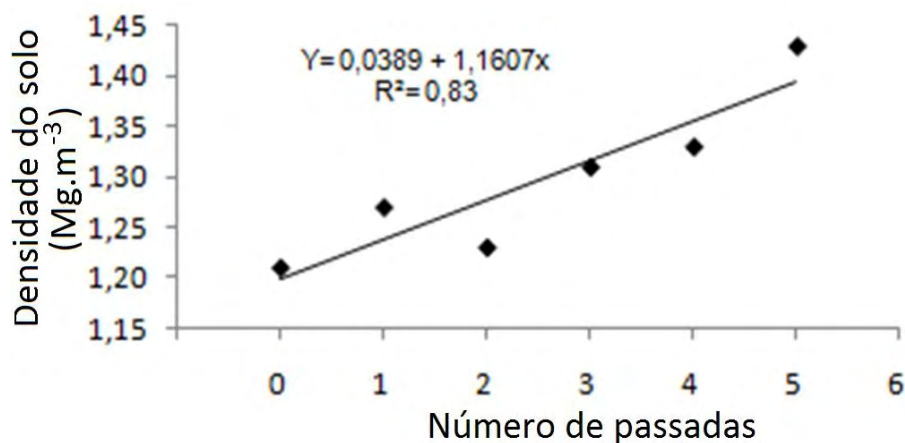


Figura 17 – Média dos valores de densidade do solo em relação a interação camadas e número de passadas na camada de 0,00-0,05 m.

Na camada de 0,10-0,15 m, as densidades médias do solo foram menores do que na camada de 0,00-0,05 m. A densidade do solo na 5ª passada na camada de 0,10-0,15 m chegou a 1,30 Mg.m⁻³, sendo que densidade semelhante (1,31 Mg.m⁻³) foi observada na 3ª passada da camada de 0,00-0,05 m de profundidade, apresentando maior compactação devido ao tráfego, demonstrando que a camada de 0,00-0,05 m sofre a maior compactação do estudo, confirmando a análise dos dados apresentados na Tabela 7. Este fato é confirmado por Froehlich et al. (1980), o qual enfatiza que a compactação a 0,15 m foi 50% menor que a 0,05 m. Conforme ocorreram as passadas, os aumentos das densidades médias em cada passada tiveram um crescimento próximo ao linear, somente na 4ª passada que apresentou um valor de 1,23 Mg.m⁻³ sendo o mesmo valor obtido na 3ª passada, fato confirmado pelo valor de R² ser de 0,90 (Figura 18).

A compactação do solo causada por elevadas cargas por eixo, sob condições normais de aumento de densidade do solo com a profundidade, utilizando pressão do pneu que tenha contato baixo a médio com o solo, independente da carga por eixo, a compactação permanecerá confinada na zona superior de manejo do solo ou imediatamente abaixo dela. No entanto, altas cargas por eixo aumentarão o volume de solo e profundidade afetados pela compactação. Camadas no subsolo serão compactadas quando o solo for trafegado com pneus largos e altas cargas por eixo, com moderada a alta pressão

de contato (250-450 kPa), somente em solos úmidos ou sob elevada pressão de contato (> 500 kPa) (pneus estreitos com elevada carga por eixo) (HADAS, 1994). Baseado na citação anterior, pode-se concluir que a carga por eixo do trator Skidder durante o experimento não excedeu o limite de carga por eixo, pois a maior compactação ocorreu na camada de 0,00 a 0,05 m de profundidade.

Reichert et al. (2007) constataram que em áreas agrícolas e pastagem a compactação ocorre até, no máximo, 0,20 m, enquanto em áreas florestais pode atingir maiores profundidades. Afirmam ainda que, em áreas florestais, com o revolvimento do solo para plantio do novo povoamento a compactação é eliminada até a camada de ação dos implementos, porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece.

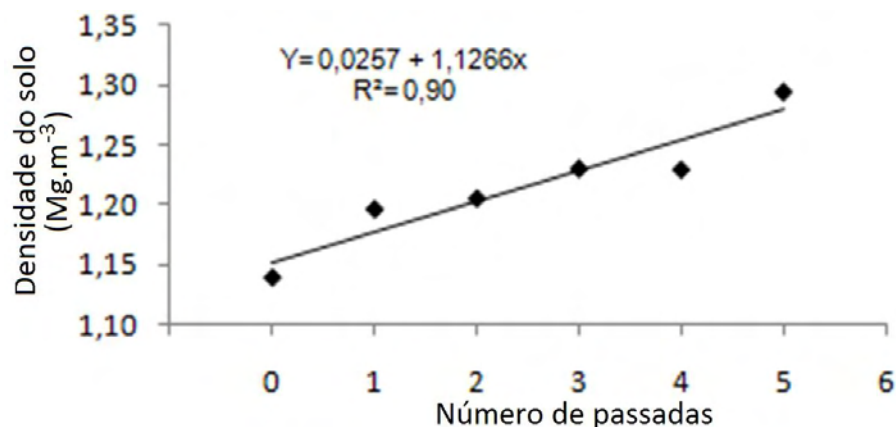


Figura 18 – Média dos valores de densidade do solo em relação a interação camadas e número de passadas na camada de 0,10-0,15 m.

O comportamento compressivo de diferentes solos (teor de argila variando entre 97 e 657 g kg⁻¹) demonstrou que solo mais argiloso, dada a sua maior capacidade de retenção de água, haverá a necessidade de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresenta maior susceptibilidade à compactação adicional, quando cargas superiores às que o solo já sofreu são aplicadas (SUZUKI, 2005). A explicação para esse fato é que a água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo que irá atuar como um lubrificante, facilitando o deslocamento e rearranjo das partículas nos vazios do solo (SILVA et al., 2000b). Esses autores afirmam que, especialmente para solos argilosos, deve-se ter cuidado para evitar o tráfego excessivo sobre o solo úmido.

Para condições de alto teor de água não houve aumentos significativos da compactação e que a densidade teve variações amortecidas (AUST et al. 1993), corroborando com os dados encontrados no Cambissolo do presente estudo, sendo que ocorria a deformação do solo pelo tráfego das máquinas nos ramais de extração de madeira, sendo que com umidades superiores ao ponto de máxima compactação encontrado no teste de Proctor, valor de 33 % de teor de água, ocorrerá um menor incremento de compactação conforme aumenta o teor de água.

6.2 Umidade do solo

A menor umidade do solo, durante a realização do experimento, ocorreu na passada 5 do recalque do pneu (Tabela 8), sendo que houve correlação com o valor de densidade do solo que era de $1,33 \text{ Mg.m}^{-3}$, que é justificado pelo ensaio de Proctor normal (Figura 11), no qual obteve-se maiores valores de compactação do solo em umidade menor a esta da passada 5, com máxima compactação na umidade de 33 %. As amostras foram coletadas posteriormente ao tráfego do trator Skidder na área experimental, simultaneamente a coleta de amostras indeformadas para a densidade do solo.

Para a determinação da umidade seria interessante a coleta das amostras antes do tráfego, porém nesta ocasião não foi possível porque as amostras foram coletadas nos mesmos pontos para determinação da resistência a penetração e as coletas da 1ª para a 2ª e da 3ª para a 4ª passadas foram realizadas em dias diferentes. Coletando-se as amostras antes do tráfego seria analisada a possível reação que o solo teria a determinada umidade.

Tabela 8 – Valores da porcentagem de umidade do solo no recalque do pneu.

| <i>Camadas</i> (m) | <i>Testemunha</i> (%) | <i>Passadas</i> | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> |
| <i>0,00-0,10</i> | 43,83 | 46,12 | 49,82 | 41,78 | 42,14 | 39,62 |
| <i>0,10-0,20</i> | 51,41 | 49,58 | 53,09 | 47,21 | 44,84 | 43,03 |
| <i>0,20-0,30</i> | 54,83 | 49,72 | 53,47 | 49,77 | 49,27 | 42,35 |

Para o recalque do fuste, a menor umidade do solo, foi encontrada na passada 5, na camada de 0,10 a 0,20 m sendo que foi próxima aqjl, encontrada entre a camada de 0,00-0,10 m, sendo que na camada superficial que ocorreu a maior compactação do estudo, oque pode ser explicado pela concentração da massa de 743,94 kg do fuste número 2 que foi arrastada na 5ª passada do experimento em uma área restrita de contato com o solo (Tabela 9).

Tabela 9 – Valores da porcentagem de umidade do solo no recalque do fuste.

| <i>Camadas</i> (m) | <i>Testemunha</i> (%) | <i>Passadas</i> | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> |
| <i>0,00-0,10</i> | 43,83 | 45,49 | 49,59 | 50,35 | 42,33 | 41,68 |
| <i>0,10-0,20</i> | 51,41 | 46,47 | 50,66 | 51,94 | 47,17 | 40,68 |
| <i>0,20-0,30</i> | 54,83 | 47,54 | 46,22 | 51,89 | 48,80 | 44,15 |

Os resultados obtidos no ensaio de Proctor normal (figura 11) e na umidade do solo (Tabela 8 e 9), demonstram que quando o Cambissolo Háplico está com umidades acima do ponto de umidade ótima, encontrado no teste de Proctor, haverá uma menor compactação do solo. Enquanto que, em umidades que solos intemperizados sofreriam compactação, este solo suportará as pressões impostas pelo trafego e sofrerá uma menor compactação, corroborando com Santos et al. (2005) que citam a maior capacidade de suporte de carga deste solo se deve provavelmente ao maior ajuste entre e dentro dos

agregados de tamanho pequeno a médio no formato de blocos com grau de coesão moderado a forte.

7 CONCLUSÕES

A camada superficial sofreu maior influência do tráfego do trator Skidder e do arraste dos fustes, sendo que o recalque dos fustes compactou mais o solo do que o recalque do trator Skidder;

A camada que apresentou maior média de compactação foi de 0,00 a 0,05 m, sendo que as médias de compactações máximas não ultrapassaram o limite prejudicial ao crescimento adequado das plantas;

Para as variáveis tratamentos (testemunha + 5 passadas) houve diferença significativa, demonstrando que o tráfego do trator Skidder e arraste de fustes promovem compactação do solo no ramal de extração de madeira;

A umidade influenciou a compactação, sendo que o maior incremento de compactação ocorreu na 5ª passada, quando o solo apresentou as menores umidades durante o experimento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 157-165, 2001.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field trafficinduced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-160, 2003.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 963-975, 2005.

ANDRADE, S. C. et al. Análise dos efeitos da compactação do solo sobre a regeneração das cepas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, p. 261-268, 2000.

ANUÁRIO estatístico da ABRAF: ano base 2009. Brasília, DF, 2010. 140 p.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam , v. 96, p. 284-291, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **M-14-74**: normas de ensaios. São Paulo, 1974. não paginado.

AUST, W. M.; REISINGER, T. W.; STOKES, B. J. Soil physical and hydrological changes associated with logging a wet pine flats with wide-tired skidders. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, DC, v. 17, n. 1, p. 22-25, 1993.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um latossolo vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683, 2004.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-31, 1983.

BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 35-43, 1999.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 32, p. 59-62, 1980.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.

BYGDÉN, G.; WASTERLUND, I.; ELIASSON, L. Rutting and soil disturbance minimized by planning and using bogie tracks. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Universidade Federal de Viçosa/Sociedade de Investigação Florestal, 2003. p. 1-9

BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Indicações para a utilização da madeira de espécies e variedades de pinus na construção civil.** 1993. 119 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura/Tecnologia do Ambiente Construído)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

BOTTA, G. F. et al. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 53–58, 2004.

BOTTA, G.; JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal Terramechanics**, Oxford, v. 39, n. 1, p. 47-54, 2002.

BOWLES, J.A. **Engineering properties of soils and their measurements.** New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto.** 2004. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo/Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais.** 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seções transversais do caule, da base do tronco para a copa em *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 15, p. 73-82, 1977.

BRASIL, M. A. M. et al. Densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* em três regiões do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico IF**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 9-17, 1982.

BRAUNACK, M. V.; MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 86-102, 2006.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

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

CAPURRO, E. P. G. **Qualidade física de um vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 87 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CASSOL, E. A. et al. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco argilo arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 685-690, 2004.

CHAMEN, T. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

CHAN, K.Y. et al. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Till Research**, Amsterdam, v. 89, p.13-21, 2006.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

CONWAY, S. **Logging practices: principles of timber harvesting systems**. San Francisco: Miller Freeman, 1976. 416 p.

CORONEL, E. Fundamentos de las propiedades mecánicas de la madera. In: _____. **Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas**. Santiago del Estero: Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Tecnología de la Madera, 1995. pt. e 2, p. 43-63.

CORONEL, E. O. **Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas**. Santiago del Estero: ITM, 1994. v 1. 187 p. (Serie de publicaciones, 9404).

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, S. A. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 527-535, 2003.

CRUZ, A. C. R. et al. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1105-1112, 2003.

CURI, N. et al. **Vocabulário da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

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

DAL PONTE FILHO, J. L. et al. Influência da idade em propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS APLICADAS DA FAEF, 7., 2004, Garça. **Anais...** Garça: FAEF, 2004. p. 133-138.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.

DE JONG-HUGHES, J. et al. **Soil compacting**: causes, effects and control. Morris, Minnesota: University of Minnesota Extension Service, 2001. 15 p. (Communication and Educational Technology Services).

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 54-94.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

ERIKSON, H. D.; HARRINSON, A. T. Douglas-fir wood quality studies: part I: effects of age and stimulate growth on wood density and anatomy. **Wood Science Technology**, München, v. 8, p. 225-265, 1974.

EVANS, J. L. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 8, p. 75-87, 2000.

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

FERREIRA, M. Estudo da variação da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reiw e *Eucalyptus saligna* Smith. **IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 83-96, 1970.

FERREIRA, M.; HIGA, R.; KAGEYAMA, P. Y. Variação da massa específica básica da madeira de *Pinus elliotti* var. *elliottii* e *Pinus taeda*. **IPEF**, Piracicaba, n. 7, p. 79-91, 1973.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 487-493, 2000.

FOELKEL, C. E. B. et al. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1983, São Paulo. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-731, 1983.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 49-57, 2006.

FROEHLICH, H.A. et al. Predicting soil compaction on forested land. (Final Project Report, Coop. Agreement n.228). Missoula: Forest Service, Equip. Dev. Center, 1980. 1210 p.

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

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 213-218, 2002.

HADAS, A. Soil compaction caused by high axle loads: review of concepts and experimental data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, p. 253-276, 1994.

HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Uppsala: Dept. of Soil Sciences, Division of Soil Management. 2005. 153 p.

HÅKANSSON, I; REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2/3, p. 277-304, 1994.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R. et al. (Eds.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p. 167-179.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988

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

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

HOFMANN, R. **Bodenschaden durch forstmaschineneinsatz - untersucht am beispiel lehmig-sandiger boden auf buntsandstein bei befahrung zustand der fruhjahrsfeuchte**. 1988. 141 f. Dissertation-Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, Freiburg, 1988.

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, p. 77-88, 2003.

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

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

IEZZI, G. et al. **Matemática**. São Paulo: Atual, 1978. 325 p.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa geológico do Estado de São Paulo**: 1:500.000. São Paulo: IPT, v. 1, 1981, p. 46-8; 69 (Publicação IPT 1184).

JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p. 445-452, 2000.

KELLER, T.; TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 39-47, 2002.

KNIGGE, W.; SCHULTZ, H. *Growndise der Forestbenutzung*. Berlin: Verlag Paul Parey 1966. 584 p.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JR, W. A. **Principles of wood science and technology**. I. Solid Wood. New York: Springer, 1968.

KRETSCHEK, O. E. et al. Sistema de colheita de madeira com a utilização de cabos aéreos como alternativa para regiões inclinadas. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 14., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, UFPR, 2006. p. 123-131.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 160 p.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas: possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1990. 343 p.

LANFORD, B. L.; STOKES, B. J. Comparison of two thinning systems: part 1: stand and site impacts. **Forest Products Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 74-79, 1995.

LANÇAS, K.P. et al. Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35 n. 2, 2005. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/cr/v35n2/a18v35n2.pdf>. Acesso em: 24 set. 2010.

LANÇAS, K. P. **Tráfego, tração e compactação**: otimização e desafios. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007. Disponível em: <<http://www6.ufrgs.br/cbcs/palestras/KleberLancas.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2010.

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

LEÃO, T. P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIMA, C. L. R. et al. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um argissolo vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1172-1178, 2006.

LIMA, M. R.; SIRTOLI, A. E. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. 341 p.

LIMA, J. S. S. et al. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.

LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; OLIVEIRA, A. D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Revista Ciência e Prática**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 123-127, 1992.

LIMA, J. S. S. et al. Avaliação da compactação do solo em um sistema de colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 276-282, 2000.

LOCKABY, B. G.; VIDRINE, C. G. Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, DC, v. 8, n. 2, p. 109-112, 1984.

MACHADO, C. C. **Exploração florestal**. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 1984. v. 3, 60 p.

MINETTE, L. J. et al. Carregamento e descarregamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 146-160.

MALINOVSKI, J. R. et al. Carregamento e descarregamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 161-184.

MCMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. **Logging Industry Research Organisation Report**, v. 9, p. 1-8, 1994.

MACNABB, D. H.; FROEHLICH, H. A. Conceptual model for predicting forest losses from soil compaction. In: SAF NATIONAL CONVENTION, 1983, Portland. **Proceedings...** Portland: SAF, 1983. p. 261-265.

MCNEEL, J. F.; BALLARD, T. M. Analysis of site stand impacts from thinning with a harvester-forwarder system. **Journal of Forest Engineering**, New Brunswick's, v. 4, n. 1, p. 23-29, 1992.

MEEK, P. Effects of skidder traffic on two soils in the Canadian boreal forest. In: INTERACTIVE WORKSHOP AND SEMINAR FORSITRISK SOIL, TREE, MACHINE INTERACTIONS, 11., 1994, Feldafing. **Proceedings...**Feldafing: European Union, 1994. AIR2-CT93-1538.

MEGRAW, R. A. **Wood quality factors in Loblolly pine**. Atlanta: TAPP, 1985. 88 p.

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F., LIMA J. T. Variação da Massa específica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldtl. no sentido longitudinal dos caules. **Revista Cerne**, Lavras, v. 5, n.1, p. 1-7, 1999.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 117-162.

MÓSENA, M.; DILLENBURG, L. R. Early growth of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia* [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. **Plant Soil**, Crawley, v. 258, p. 293-306, 2004.

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

PAIT, J. A.; FLINCHUM, D. M.; LANTZ, C. W. Species variation, allocation, and tree improvement. In: _____. **Forest regeneration manual**. London: Kluwer Academic, 1991. p. 207-231.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970. v. 1.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 404 p.

PAVINATO, A. et al. Resíduos culturais de espécies de inverno e o rendimento de grãos de milho no sistema de cultivo mínimo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 9, p. 427-432, 1994.

PETERSON, T. A. Radial variation in growth patterns and specific gravity of red pine (*Pinus resinosa*). **Forest Products Journal**, Madison, v. 18, p. 62, 1968.

PEREIRA, J. C. D. et al. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalyptus dunnii* maiden, para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 13, p. 9-16, 1986.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 929-938, 2000.

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

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. J. **Terramechanics**, v. 42, p. 259-280, 2005.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 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: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa:NEPUT, 2002. 338 p.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 53, p. 71-78, 1998.

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

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 298-303, 2002.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 109-115, 2002.

SALIRE, E. V.; HAMMEN, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 235-248, 1994.

SANT'ANNA, C. M. Corte. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 66-96.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed., Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92 p.

SANCHES, A. C. **Manejo para produção sustentável de citros**: resultados práticos (compact disc). In: SIMPÓSIO SOBRE FISIOLOGIA, NUTRIÇÃO, ADUBAÇÃO E MANEJO PARA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE CITROS, 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS, 2000. 1 CD-ROM.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 797-804, 2004.

SEILER, J. R. et al. **Slash pine *Pinaceae Pinus elliotii* Engelm.** Disponível em: <<http://www.cnr.vt.edu/DENDRO/dendrology/syllabus/factsheet.cfm?ID=102>>. Acesso em: 31 out. 2010.

SEIXAS, F. Potencial de danos dos sistemas de colheita de madeira no solo e nas cepas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 63-78, 1997.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75 f. Tese (Livro Docência)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 97-145.

SEIXAS, F. **Solos**: compactação. Pelotas: Cultivar, 2002. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/arquivos/maquinas07_compactacao.pdf>. Acesso em: 02 out. 2010.

SEIXAS, F.; MAGRO, T. C. Indicadores ambientais e paisagísticos relacionados às operações florestais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 12, n. 31, p. 65-78, 1998.

SEIXAS, F.; SOUZA, C. R. S. The use of bulk density and cone penetrometer resistance as indicators to evaluate the influence of forestry machine traffic on soil compaction. In: IUFRO CONFERENCE ON INDICATORS FOR SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT, 1998, Melbourne, **Proceedings...** Melbourne: Natural Resources and Environment, 1998. p. 156-157.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de “forwarder” com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p.178-187, 2003a.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; COSTA, L. G. Soil compaction and GPS determination of impacted area by skidder traffic. In: FOREST ENGINEERING CONFERENCE, 2., 2003, Växjö, Suécia. **Proceedings...** Technique and Methods. Uppsala: Skogforsk, 2003b. p.124-129.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 54, p. 9-16, 1998.

SEIXAS, F. et al. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: **COFE Annual Meeting**, n XVIII, 1995, Cashiers. **Proceedings...** Cashiers: COFE, 1995. p. 77-86.

SERPA, P. N. et al. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723-33, 2003.

SEVERIANO, E. C. et al. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 159-168, 2009.

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

SIDLE, R. C.; DRLICA, D. M. Soil compaction from logging with a low-ground pressure skidder in the Oregon Coast Ranges. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1219-1224, 1981.

SCHÄFER, M.J. et al. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 431-441, 2001.

SILVA, A. J. N. **Caracterização de latossolos amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. 1996, 133 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1996.

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

SILVA, V. R. **Compressibilidade de um Podzólico e um latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água**. 1999. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Biodinâmica de Solos)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular da soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 6, p. 855-860, 2002.

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

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um latossolo vermelho-escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 31-40, 2006a.

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

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; VILAS BOAS, J. E. B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 759-768, 2006c.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação da temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 391-399, 2006d.

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

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000a.

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 Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 239-249, 2000b.

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

SILVEIRA, G. M. **Preparo do solo: técnicas e implementos**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. 292 p.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil & Tillage Research**, v. 41, n.1/2, p.53-73, 1997.

SOWERS, G. F. Consistency. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 391-399.

SOUZA, A. P. et al. Perspectivas na área de colheita e transporte florestal. **Revista da Madeira**, n. 51, p. 52-62, 2002.

SPOOR, G.; TIJINK, F. G. J.; WEISSKOPF, P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 175-182, 2003.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILLAR, O. M. Compactação do solo. In: _____. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. São Paulo: USP, 1981. p. 81-93.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 60, p. 15-24, 1995.

STUDIER, D. D.; BINKLEY, V. W. **Cable logging systems**. Corvallis: Oregon State University, 1981. 211 p.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e suas influências nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TARAS, M. A. Some wood properties of slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) and their relationship to age and height within the stem. **Agriculture**, v. 26, n. 2, p. 559-600, 1965.

TESSIER, S.; LAGUE, C. Soil compaction by liquid manure tanker. **Transactions of ASAE**, Michigan, v. 34, n. 2, p. 402-413, 1991.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, 1985.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSoja, 1999. 58p. Circular Técnica, n. 23.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2007.

VENTURA, A. Problemas técnicos da silvicultura paulista. **Silvicultura São Paulo**, São Paulo, v. 3, p. 61-80, 1964.

VOLPATO, C. E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. Otimização da produtividade e do custo da extração florestal com o guincho-arrastador. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 296-307, 1991.

WILEY, J. C. et al. **Optimizing dynamic stability and performance of tractors with radial tires**. St. Joseph: ASAE, 1992. 15 p. (Paper n. 921586).

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 239-245, 1997.