

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**COMPACTAÇÃO DE CAMBISSOLO E NEOSSOLOS
CAUSADA PELA COLHEITA DE MADEIRA COM
FELLER-BUNCHER E SKIDDER**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JEAN ALBERTO SAMPIETRO

IRATI-PR

2010

JEAN ALBERTO SAMPIETRO

**COMPACTAÇÃO DE CAMBISSOLO E NEOSSOLOS CAUSADA PELA COLHEITA
DE MADEIRA COM FELLER-BUNCHER E SKIDDER**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Colheita Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes
Orientador

Prof^a. Dr^a. Kátia Cylene Lombardi
Co-Orientadora

IRATI-PR

2010

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO - *Campus* de Irati

S192c SAMPIETRO, Jean Alberto.
Compactação de cambissolo e neossolos causada pela colheita de madeira com Feller-Buncher e Skidder / Jean Alberto Sampietro. – Irati, PR : UNICENTRO, 2010.

121 p.
ISBN
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR
Orientador : Professor Dr. Eduardo da Silva Lopes
Co-orientador : Professora Dra. Kátia Cylene Lombardi

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Floresta – colheita.
3. Manejo sustentável. I. Lopes, Eduardo da Silva. II. Lombardi, Kátia Cylene. III. Título.

CDD 20^a ed. 634



Universidade Estadual do Centro-Oeste

Reconhecida pelo Decreto Estadual nº 3.444, de 8 de agosto de 1997

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

Defesa Nº 10

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, *Campus* de Irati, após arguir o mestrando **Jean Alberto Sampietro** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "Compactação de cambissolo e neossolos causada pela colheita de madeira com *feller buncher* e *skidder*", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do estudante, habilitando-o ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 02 de março de 2010.



Dr. Fernando Seixas
Universidade de São Paulo
Primeiro Examinador



Dr. José Miguel Reichert
Universidade Federal de Santa Maria
Segundo Examinador



Dr. Eduardo da Silva Lopes
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Pres. Zacarias 875 – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090 – CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR
Campus CEDETEG: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03 – Fone/FAX: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-080 – GUARAPUAVA – PR
Campus de Irati: PR 153 – Km 07 – Riozinho – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000 – FAX: (42) 3421-3067 – CEP 84.500-000 – IRATI – PR

À Deus,
AGRADEÇO

À minha querida, muito amada e incentivadora mãe Ana Maria Sampietro, ao meu sempre amado pai Gumercindo Sampietro Sobrinho (*in memorian*), às minhas amadas irmãs Leila Mari Sampietro Hendges (*in memorian*) e Leidh Jeane Sampietro Pinto, à minha querida tia Ivone do Carmo Kinceler, à minha avó Nair Quintiliano da Rocha, aos meus tios e sobrinhos, e à minha amada noiva Silvane de Fátima Siqueira que soube me amar e ter paciência como em todos os momentos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus que ilumina e abençoa meu caminho;

À Universidade Estadual do Centro-Oeste, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo acolhimento e possibilidade de realização deste trabalho;

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes, pela valiosa orientação, amizade, estímulo, confiança e compreensão no desenvolvimento e conclusão deste trabalho;

À Prof^a. Dr^a. Kátia Cylene Lombardi pela co-orientação, amizade e confiança;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais: Dr. Luciano Farinha Watzlawick, Dr. Julio Eduardo Arce, Dr^a. Andrea Nogueira Dias e Dr. Afonso Figueiredo Filho, pelas sugestões e ensinamentos durante o curso;

À técnica Odiméia Teixeira pelo apoio e colaboração na realização das análises laboratoriais. E à Nilce Flávia Bühler dos Santos, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela amizade e atenção;

À Battistella Florestal pelo grande apoio, interesse e concessão de suas áreas, permitindo que este trabalho pudesse ser realizado, e aos seus funcionários pela ajuda prestada durante as atividades de campo;

Aos colegas e amigos de pós-graduação, e em especial aos companheiros André Leonardo Nasser Pereira e Rodrigo Lima, pela dedicação, apoio, colaboração e amizade incondicional, e pelos momentos de descontração que estimularam mesmo nas horas difíceis;

Aos acadêmicos Diego de Oliveira, Rafael Henrique da Silva e Carla Krulikowski Rodrigues, pelo auxílio na coleta de dados e nas análises laboratoriais;

À todos os amigos que conviveram comigo, incentivando e estando presentes dando apoio diante das dificuldades, em especial à Eliton Luiz Moreira, Diego Sgarbossa Adur, Guilherme Augusto Borgo, André Ribeiro e Ruddy Marcondes Barbosa;

À minha família, e em especial aos meus pais, Ana Maria Sampietro e Gumercindo Sampietro Sobrinho (*in memoriam*), que nunca mediram esforços para a minha formação pessoal e profissional;

À minha noiva Silvane de Fátima Siqueira, que suportou horas por mim gastas neste trabalho, com amor, confiança e compreensão;

Enfim, a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
3.1. Colheita florestal	3
3.1.1. Conceito	3
3.1.2. Principais máquinas e equipamentos.....	4
3.1.3. Sistemas de colheita florestal	5
3.2. Compactação do solo	6
3.2.1. Conceitos.....	6
3.2.2. Fatores de influência	7
3.2.2.1. Matéria orgânica do solo	7
3.2.2.2. Textura do solo	8
3.2.2.3. Umidade do solo	8
3.2.2.4. Camada de resíduos da colheita de madeira.....	10
3.2.2.5. Peso da máquina	10
3.2.2.6. Pressão no solo	11
3.2.2.7. Intensidade de tráfego.....	11
3.2.2.8. Tipos e tamanho dos rodados	12
3.2.3. Efeitos da compactação sobre o solo e as plantas	13
3.2.4. Atributos físicos do solo.....	16
3.2.4.1. Densidade do solo.....	16
3.2.4.2. Porosidade total	18
3.2.4.3. Resistência mecânica do solo à penetração	19
3.2.5. Medidas mitigadoras da compactação do solo	20
3.2.6. Modelagem da compactação do solo	21
4. CAPÍTULO I — INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA COMPACTAÇÃO DE SOLOS SUBMETIDOS AO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA	24
4.1. INTRODUÇÃO.....	24
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.2.1. Caracterização da área de estudo	25
4.2.1.1. Localização e clima	25
4.2.1.2. Histórico, solos e povoamento florestal	26
4.2.1.3. Sistema de colheita da madeira	28
4.2.2. Procedimento amostral.....	30
4.2.3. Análises físicas do solo	33
4.2.3.1. Densidade do solo.....	33
4.2.3.2. Porosidade total do solo.....	34

4.2.3.3. Umidade gravimétrica do solo.....	34
4.2.3.4. Resistência do solo à penetração	34
4.2.4. Análises estatísticas.....	35
4.2.4.1. Análise de variância e comparação de médias	35
4.2.4.2. Relações e desenvolvimento de equações para estimativa da resistência à penetração	35
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.3.1. Densidade do solo	37
4.3.2. Porosidade total do solo	44
4.3.3. Resistência do solo à penetração	51
4.3.4. Relações entre a resistência à penetração e os outros atributos avaliados	59
4.3.4.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)	59
4.3.4.2. Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).....	62
4.3.5. Estimativa da resistência do solo à penetração	64
4.3.5.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)	64
4.3.5.2. Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).....	68
4.4. CONCLUSÕES	73
5. CAPÍTULO II — AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE FELLER-BUNCHER E SKIDDER NA COMPACTAÇÃO DE SOLOS FLORESTAIS.....	74
5.1. INTRODUÇÃO.....	74
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	75
5.2.1. Caracterização da área de estudo	75
5.2.1.1. Localização e clima	75
5.2.1.2. Histórico, solos e povoamento florestal	76
5.2.1.3. Sistema de colheita da madeira	78
5.2.1.4. Camada de resíduos da colheita de madeira.....	78
5.2.2. Procedimento amostral.....	78
5.2.3. Análises físicas do solo	80
5.2.3.1. Densidade do solo e porosidade total	80
5.2.3.2. Resistência do solo à penetração	80
5.2.4. Análises estatísticas.....	81
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.3.1. Densidade do solo	82
5.3.2. Porosidade total.....	87
5.3.3. Resistência do solo à penetração	89
5.3.3.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)	89
5.3.3.2. Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).....	97
5.4. CONCLUSÕES	104
6. CONCLUSÕES GERAIS	105
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
8. ANEXOS	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria e teor de carbono orgânico (C-org) para os solos e profundidades avaliadas.	27
Tabela 2. Características do povoamento florestal da Fazenda Cerro Azul B.	27
Tabela 3. Características das máquinas de colheita da madeira.	30
Tabela 4. Número de amostras (N) por classe de umidade gravimétrica e profundidade nos solos avaliados.	32
Tabela 5. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	41
Tabela 6. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	42
Tabela 7. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	49
Tabela 8. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	50
Tabela 9. Valores médios de resistência do solo à penetração (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	56
Tabela 10. Valores médios de resistência do solo à penetração (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	57
Tabela 11. Estatística descritiva para as variáveis avaliadas no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	60
Tabela 12. Estatística descritiva para as variáveis avaliadas no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	62
Tabela 13. Modelos selecionados para estimativa da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	65
Tabela 14. Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	66
Tabela 15. Modelos selecionados para estimativa da resistência do solo à penetração no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	69
Tabela 16. Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	70
Tabela 17. Granulometria, teor de carbono orgânico (C-org) e umidade gravimétrica média (Ug) para os solos e profundidades avaliadas.	77
Tabela 18. Características dos povoamentos florestais das áreas de estudo.	77
Tabela 19. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos solos avaliados.	86
Tabela 20. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos solos avaliados.	89
Tabela 21. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de tráfego, posições e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (Cha).	94

Tabela 22. Análise de variância em fatorial da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).....	96
Tabela 23. Valores médios de resistência do solo à penetração por intensidade de tráfego e posição no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).....	96
Tabela 24. Valores médios de resistência do solo à penetração nas diferentes intensidades de tráfego, posições e profundidades no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).....	101
Tabela 25. Análise de variância em fatorial da resistência do solo à penetração no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).....	103
Tabela 26. Valores médios de resistência do solo à penetração por intensidade de tráfego e posição no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Trator florestal <i>Feller-buncher</i>	28
Figura 2. Trator florestal <i>Skidder</i>	29
Figura 3. Desgalhamento com motosserra.	29
Figura 4. Processador Florestal.	30
Figura 5. Esquema da coleta de amostras indeformadas de solo nas parcelas e profundidades.	31
Figura 6. Trado para amostrais indeformadas (TAI), marca <i>Soil Control</i>	33
Figura 7. Penetrógrafo eletrônico digital, marca <i>Eijkelkamp</i>	35
Figura 8. Valores médios de densidade do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	38
Figura 9. Valores médios de densidade do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	39
Figura 10. Diferenças médias percentuais da densidade do solo considerando após tráfego e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b); Seta laranja indica limite crítico restritivo ao crescimento radicular de acordo com Geist <i>et al.</i> (1989).	44
Figura 11. Valores médios de porosidade total do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	45
Figura 12. Valores médios de porosidade total do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	46
Figura 13. Diferenças médias percentuais da porosidade total do solo considerando após e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b).	51
Figura 14. Valores médios de resistência do solo à penetração sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa); Seta laranja indica valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY <i>et al.</i> , 1995; TORMENA <i>et al.</i> , 1998a); Seta vermelha indica valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU <i>et al.</i> ; 2000).	53
Figura 15. Valores médios de resistência do solo à penetração sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh); Seta laranja indica valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY <i>et al.</i> , 1995; TORMENA <i>et al.</i> , 1998a); Seta vermelha indica valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (Zou <i>et al.</i> ; 2000).	54
Figura 16. Diferenças médias percentuais da resistência do solo à penetração considerando após e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b).	59
Figura 17. Regressões lineares no CHa entre: a) densidade do solo e resistência à penetração; b) porosidade total e resistência à penetração; c) umidade gravimétrica e resistência à penetração; regressões considerando 5% de significância.	61
Figura 18. Regressões lineares no RRh entre: a) densidade do solo e resistência à penetração; b) porosidade total e resistência à penetração; c) umidade gravimétrica e resistência à penetração; regressões considerando 5% de significância.	63
Figura 19. Distribuição percentual dos resíduos em relação à umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	66

Figura 20. Resistência à penetração estimada (RP estimada) pelo Modelo por <i>Stepwise</i> Aritmético com variáveis Mistas (MSAM) em função da umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).	67
Figura 21. Distribuição percentual dos resíduos em relação à umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	71
Figura 22. Resistência à penetração estimada (RP estimada) pelo Modelo por <i>Stepwise</i> Logarítmico com variáveis Mistas (MSLM) em função da umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).	72
Figura 23. Desenho do esquema amostral, mostrando a distribuição das parcelas e dos pontos amostrais em cada parcela.	79
Figura 24. Desenho do esquema das medições de resistência à penetração nas posições em relação à linha de tráfego das máquinas de colheita da madeira.	81
Figura 25. Valores médios de densidade do solo para as diferentes intensidades de tráfego no CHa (a) e no RRh (b)	83
Figura 26. Valores médios de porosidade total do solo para as diferentes intensidades de tráfego no CHa (a) e no RRh (b).	87
Figura 27. Valores médios de resistência à penetração para as posições e intensidades de tráfego no CHa. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados a 25 cm de distância (FR25); d) Fora dos rodados a 50 cm (FR50); e) Fora dos rodados a 75 cm (FR75); f) Fora dos rodados a 100 cm (FR100); Setas laranja indicam valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY <i>et al.</i> , 1995; TORMENA <i>et al.</i> , 1998a); Setas vermelha indicam valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU <i>et al.</i> ; 2000).	90
Figura 28. Valores médios de resistência à penetração para as posições e intensidades de tráfego no RLh. a) Linha dos rodados (RD); b) Entre rodados (ER); c) Fora dos rodados a 25 cm de distância (FR25); d) Fora dos rodados a 50 cm (FR50); e) Fora dos rodados a 75 cm (FR75); f) Fora dos rodados a 100 cm (FR100); Setas laranja indicam valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY <i>et al.</i> , 1995; TORMENA <i>et al.</i> , 1998a); Setas vermelha indicam valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU <i>et al.</i> ; 2000).	98

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

t	Tonelada
kg.m⁻²	Quilograma por metro quadrado
%	Percentual
cm	Centímetro
m	Metro
kPa	Quilo pascal
MPa	Mega pascal
°C	Graus Celsius
mm	Milímetro
CHa	Cambissolo Húmico Aluminíco típico
RRh	Neossolo Regolítico Húmico típico
RLh	Neossolo Litólico Húmico típico
C-org	Carbono orgânico (g.dm ⁻³)
Dp	Densidade de partículas ou densidade real (g.cm ⁻³) ou (Mg.m ⁻³)
m².ha⁻¹	Metro quadrado por hectare
ha	Hectare
m³	Metro cúbico
m³.ha⁻¹	Metro cúbico por hectare
hp	<i>Horse Power</i>
kW	<i>Kilowatts</i>
psi	<i>Pound per Square Inch</i>
m²	Metro quadrado
Ug	Umidade gravimétrica do solo (kg.kg ⁻¹)
Ds	Densidade do solo (g.cm ⁻³) ou (Mg.m ⁻³)
Pt	Porosidade total do solo (m ³ .m ⁻³)
RP	Resistência do solo à penetração (MPa)
θ	Umidade volumétrica do solo (m ³ .m ⁻³)
cm.s⁻¹	Centímetro por segundo
cm³	Centímetro cúbico
cm²	Centímetro quadrado

R²	Coeficiente de determinação
R² aj	Coeficiente de determinação ajustado
Syx	Erro padrão da estimativa absoluto
Syx %	Erro padrão da estimativa em percentagem
F	Valor de F calculado
CV %	Coeficiente de variação
N	Número de repetições

RESUMO

Jean Alberto Sampietro. Compactação de Cambissolo e Neossolos Causada Pela Colheita de Madeira com Feller-buncher e Skidder.

A compactação causada pelo tráfego de máquinas de colheita da madeira é um fator importante em virtude da possibilidade de alteração nas propriedades dos solos, afetando o desenvolvimento de plantas e, conseqüentemente, trazendo prejuízos à produtividade florestal. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a compactação causada pelo tráfego de máquinas de colheita de madeira em diferentes solos submetidos a distintas umidades e intensidades de tráfego em povoamentos de *Pinus taeda L.*, contribuindo com informações para o planejamento das operações, sustentabilidade florestal, aumento de produtividade e redução de custos. Os estudos foram conduzidos nas áreas operacionais da empresa Battistella Florestal, localizada na região Norte do Estado de Santa Catarina. Para analisar a influência da umidade na compactação, foram coletados dados em diferentes períodos, durante condições secas e chuvosas, contemplando distintas umidades distribuídas em classes, sendo comparada a diferença entre a situação sem tráfego e após tráfego das máquinas. Para a avaliação da intensidade de tráfego na compactação, foram instaladas parcelas amostrais em função da simulação de diferentes condições de tráfego. A compactação foi determinada pela densidade do solo, porosidade total e resistência à penetração. Os principais resultados foram: a elevação da umidade do solo acarretou em maiores alterações das propriedades avaliadas, demonstrando que o tráfego das máquinas em condições úmidas causa maior compactação; a maior parte da compactação dos solos avaliados foi resultante das primeiras passadas das máquinas; o tráfego das máquinas causou alterações nos solos até 80 cm de profundidade e a 100 cm de distância da linha dos rodados; os solos avaliados se comportaram diferentemente frente às condições impostas. De forma geral, foi confirmada a necessidade de medidas para reduzir a compactação, conforme as condições de umidade, intensidade de tráfego e classes de solo. O monitoramento da precipitação e a concentração do tráfego em carregadores pré-determinados poderão contribuir para diminuir a extensão dos efeitos compactação do solo, reduzindo os impactos ao meio ambiente e às rotações florestais futuras.

Palavras-Chave: compactação do solo, condição de umidade, intensidade de tráfego, colheita de madeira.

ABSTRACT

Jean Alberto Sampietro. Compaction of Cambisol and Neosoils Caused by Wood Harvest with Feller-buncher and Skidder.

The compaction caused by traffic of timber harvesting machines is an important factor because of the possibility of changing the properties of the soil, affecting plant growth, and thus causing losses in forest productivity. The aim of this study was to evaluate the compaction caused by traffic of timber harvesting machines in different soils subjected to different moistures and traffic intensities in stands of *Pinus taeda* L., contributing with information to the planning of operations, forestry sustainability, increased productivity and reduction of costs. The studies were conducted in the operational areas of the company Battistella Florestal, located in the Northern Part of the State of Santa Catarina. To analyze the influence of moisture content in compaction, data were obtained at different times, during the dry and rainy seasons, accommodating different soil moisture contents divided into classes, and compared the difference between the situation without traffic and after machines traffic. To reveal the effects of the traffic intensity in compaction, sample plots were established according to the simulation of different traffic conditions. To evaluate the compaction, bulk density, total porosity and soil resistance to penetration were determined. The main results were: the elevation of soil moisture content resulted in major changes of the studies properties, demonstrating that the traffic of the machines in wet conditions cause greater compaction; most part of the compaction at evaluated soils has resulted of the first pass of the forest harvesting machines; the traffic of machinery caused changes in soil up to 80 cm depth and 100 cm away from the line of the wheelsets; the evaluated soils behaved differently to the imposed conditions. In general, the needed of measures to reduce soil compaction was confirmed, according to the moisture content, traffic intensity and soil type. The monitoring of precipitation and concentration of traffic into predetermined carriers, can contribute to reduce the extent of soil compaction effects, reducing the environment impacts and future forest rotations.

Keywords: soil compaction, moisture content, traffic intensity, timber harvesting.

1. INTRODUÇÃO GERAL

No início da década de 90, com a abertura do mercado à importação, houve uma intensificação da mecanização da colheita de madeira, com o uso de máquinas pesadas de alta tecnologia e elevados custos, porém, acarretando em vários problemas de ordem ambiental nos recursos edáficos das áreas florestais. O aumento do tamanho, da potência e do tráfego das máquinas de colheita da madeira é a principal causa da deterioração física de solos florestais. Devido à elevada intensidade de tráfego durante as operações de corte e extração de madeira, os solos florestais são submetidos a tensões intensas, principalmente, quando se encontram em determinadas condições de umidade.

Segundo Lima *et al.* (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.

O conhecimento da compactação do solo e de sua relação com o sistema de colheita da madeira são informações importantes para o manejo adequado das condições do solo e, assim, minimizar os efeitos negativos ocasionados pelo tráfego. As medidas de redução da compactação dependem do propósito pretendido, como por exemplo, os requerimentos para tração e mobilidade são bem diferentes daqueles para infiltração e desenvolvimento das raízes (CINTRA *et al.*, 1983; SCHAFER *et al.*, 1989).

Greacen e Sands (1980) afirmam que os danos causados pela compactação em solos florestais diferem dos solos de uso agrícola, devido às características da espécie, tamanho e ciclo da cultura e das máquinas utilizadas. Reichert *et al.* (2007) citam que em áreas agrícolas a compactação ocorre até os 20 cm de profundidade, enquanto em áreas florestais atinge maiores profundidades. Além disso, de acordo com Kondo e Dias Júnior (1999), diferentes sistemas de manejo do solo causam diferentes níveis de compactação, em função da umidade, dos diferentes tipos de solos e da época de realização das operações mecanizadas.

A umidade é o principal fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo no momento da realização das operações florestais. Os solos quando estão secos apresentam maior capacidade de suporte de carga para aguentar as pressões aplicadas e

os efeitos da compactação podem ser menores. Entretanto, sob condições de alta umidade, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas.

O nível de compactação sofrido pelo solo também é determinado pela intensidade de tráfego das máquinas. Muitos estudos já comprovaram que as primeiras passadas geralmente produzem grande parte da compactação total que poderia resultar de um tráfego mais intenso.

Em solos compactados, o desenvolvimento das culturas é afetado devido à dificuldade encontrada pelo sistema radicular das plantas em se estabelecer em condições desfavoráveis ao seu crescimento. Os efeitos da compactação do solo são observados quando as raízes encontram resistência ao seu crescimento devido ao diâmetro da raiz ser superior ao do poro no solo. Com a impossibilidade de rompimento desse impedimento, ocorrem modificações no comprimento, diâmetro e distribuição das raízes das plantas, tornando todo o sistema radicular denso e raso, interferindo na absorção de nutrientes, água e oxigênio. Isso, conseqüentemente, resulta em restrição no crescimento e desenvolvimento das plantas (CAMARGO, 1983; SOANE e OUWERKERK, 1994).

Desse modo, com a possibilidade de perdas de produção acarretadas pela degradação da qualidade de solos em função do tráfego intenso em áreas de colheita da madeira, as empresas do setor florestal vêm manifestando interesses na identificação, quantificação e minimização desse problema. A compactação é um problema múltiplo que envolve a interação de diversos fatores. Por isso, a realização de estudos que visem avaliar e quantificar os efeitos do tráfego de máquinas de colheita de madeira em diferentes solos, condições de umidade e intensidade de tráfego, possibilitará nortear o planejamento dessas operações, procurando minimizar as alterações provocadas pela compactação. Além disso, subsidiará a tomada de decisão para a manutenção da sustentabilidade florestal.

O presente trabalho foi dividido em dois capítulos, sendo que o primeiro capítulo trata da influência da umidade na compactação, e o segundo capítulo da intensidade de tráfego na compactação dos solos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a compactação causada pelo tráfego de máquinas de colheita da madeira em diferentes solos, visando subsidiar o planejamento das operações florestais.

2.2. Objetivos específicos

Especificamente objetivou-se:

- a) Avaliar a influência de diferentes de umidades na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira;
- b) Avaliar o efeito da intensidade de tráfego das máquinas de colheita da madeira na compactação do solo;
- c) Verificar as relações entre as propriedades físicas do solo e desenvolver modelos para estimativa da compactação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Colheita florestal

3.1.1. Conceito

A colheita e o transporte florestal são as atividades responsáveis pelo preparo e a entrega da madeira no local de consumo. São consideradas as atividades mais importantes do setor florestal, principalmente em termos econômicos, representando mais de 50 % dos custos da madeira posta na indústria (MACHADO e LOPES, 2000).

Segundo Tanaka (1986) *apud* Machado (2008), a colheita florestal é o conjunto de operações realizadas no maciço florestal, objetivando o preparo e a extração da madeira para o local onde será efetuado o transporte principal, utilizando-se de técnicas e padrões determinados, com a finalidade de transformá-la em produto final.

Em função disso as operações de colheita florestal devem ser planejadas com eficiência, possibilitando oferecer maior segurança e ergonomia aos trabalhadores, redução dos impactos ambientais, aumento da qualidade do produto e serviço, aumento da produtividade e redução dos custos de produção (MACHADO, 2008).

De acordo com Conway (1976), as três condições primárias para o correto desenvolvimento de um sistema de colheita florestal são:

- Todos os seus componentes devem contribuir para a realização de um objetivo comum;
- É necessária a existência de uma hierarquia dentro de um sistema, para assegurar a coordenação das atividades e possibilitar a especialização dos seus componentes;
- Os novos dados de um sistema – energia, como informações e material novo, devem ser introduzidos de acordo com o planejamento específico.

O mesmo autor enfatiza que, dessa forma, se deve procurar melhorar cada processo individualmente para que o sistema como um todo possa funcionar de uma forma mais eficiente.

3.1.2. Principais máquinas e equipamentos

Durante muitos anos no Brasil, as atividades de reflorestamento dependeram da utilização de máquinas adaptadas do setor agrícola e industrial para a execução das operações. Nesse período, os sistemas manuais e semi-mecanizados foram amplamente utilizados por falta de outras opções, envolvendo grande contingente de mão-de-obra, tornando as operações onerosas e de alto risco (MACHADO, 2008).

No entanto, com a abertura do mercado à importação em 1994, o crescimento da demanda por produtos florestais, o aumento no custo da mão-de-obra, a necessidade de execução de trabalho de modo mais ergonômico, necessidade de maior eficiência das operações e diminuição dos custos de produção, muitas empresas florestais iniciaram a mecanização da colheita de madeira de forma mais intensiva (MACHADO, 2008).

Segundo Mello (1997) *apud* Lopes (2001), no Brasil são utilizadas máquinas e equipamentos de colheita florestal que foram desenvolvidos basicamente para dois sistemas: o primeiro, correspondente aos países escandinavos, voltado para o sistema de Toras Curtas (*Cut-to-length*), em que o *Harvester* executa as operações de corte e processamento, e o *Forwarder* realiza a operação de extração na forma de baldeio. O segundo corresponde aos países da América do Norte, voltado para o sistema de Árvores Inteiras (*Full-tree*), em o *Feller-buncher* realiza a derrubada e o empilhamento de feixes das árvores, o *Skidder* realiza a extração na forma de arraste, e os Processadores Florestais executam o processamento.

De acordo com Machado (2008), o setor de colheita florestal apresenta grande variedade de máquinas e equipamentos disponíveis com múltiplos propósitos nas diversas atividades que o compõem, sendo as principais:

a) **Harvester:** trator florestal que realiza, simultaneamente, as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento, descascamento e empilhamento da madeira no interior do talhão. É composta por uma máquina-base de pneus ou esteiras, uma lança hidráulica e um cabeçote;

b) **Feller-buncher:** trator florestal que realiza as operações de derrubada e empilhamento das árvores no interior do talhão, podendo ser de pneus ou esteiras e equipado com uma lança hidráulica e um cabeçote;

c) **Forwarder:** trator florestal que realiza a extração da madeira na forma de toras, da área de corte para a margem da estrada ou pátio intermediário, podendo ser de pneus ou esteiras, com um chassi articulado, tração 4 X 4, 6 X 6 ou 8 X 8, capacidade de carga de 10 a 19 t, além de uma grua hidráulica usada no carregamento e descarregamento;

d) **Skidder:** trator florestal que realiza a extração de feixes de fustes ou árvores do interior do talhão até a margem da estrada ou pátio intermediário na forma de arraste. Podem ser equipados com rodados de pneus, esteiras ou semi-esteiras, chassi articulado com uma dobradiça central dirigidos pela mudança de ângulos entre as seções frontal e traseira. Os principais tipos de *Skidder* são: de garra (*Grapple Skidder*), de cabo (*Chocker Skidder*) e de garra invertida (*Clambunk Skidder*).

3.1.3. Sistemas de colheita florestal

O sistema de colheita da madeira compreende ao conjunto de elementos e processos, integrados entre si e que permitem o fluxo constante de madeira, desde a derrubada até a madeira posta no pátio da indústria transformadora. Para um sistema obter sucesso, deve-se considerar que todos os elementos componentes atinjam o mesmo objetivo (SEIXAS, 1985).

De acordo com Machado (2008), os sistemas de colheita florestal podem variar em função de fatores, como, o relevo, o rendimento volumétrico do povoamento, o tipo de floresta, o uso final da madeira, as máquinas, equipamentos e recursos disponíveis. Conforme as condições locais, há uma combinação de atividades manuais e mecanizadas dentro de cada sistema de colheita da madeira, que baseiam-se no comprimento das toras a serem retiradas da floresta.

Segundo a FAO (1974) *apud* Machado (2008), os sistemas de colheita podem ser classificados em:

a) Sistema de Toras Curtas (*Cut-to-length*): a árvore é derrubada e processada no interior de talhão, sendo em seguida extraída para a margem da estrada ou pátio intermediário na forma de toras, com comprimento variando de um a seis metros, conforme o grau de mecanização empregado;

b) Sistema de Toras Compridas (*Tree-length*): a árvore é derrubada, desgalhada e destopada no interior do talhão, sendo em seguida o fuste extraído para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde é realizado o processamento final da madeira;

c) Sistema de Árvores Inteiras (*Full-tree*): a árvore é apenas derrubada no interior do talhão, sendo em seguida arrastada para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde é realizado o seu processamento completo;

d) Sistema de Árvores Completas (*Whole-tree*): a árvore é arrancada com parte de seu sistema radicular, sendo em seguida extraída para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde é então realizado o seu processamento completo;

e) Sistema de Cavaqueamento (*Chipping*): a árvore é derrubada e processada no interior do talhão, sendo em seguida transformada em cavacos e levados para um pátio de estocagem ou diretamente para a indústria.

3.2. Compactação do solo

3.2.1. Conceitos

A compactação é um problema que envolve interações e propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como também do clima, das práticas culturais e do tipo de cultivo. Além da expressão compactação, vários autores citam adensamento e a compressão para definirem um estado de compactação do solo (ADUR, 1990).

A compactação é a ação mecânica imposta ao solo, causando a redução de sua porosidade, podendo ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos, ocorrendo, geralmente, a redução dos macroporos, que são importantes para a movimentação de água e ar pelo solo (BAVER e GARDNER, 1973; SEIXAS, 1988). Para Silveira (2001), o solo está compactado quando a proporção de volume de poros em relação

ao volume total está inadequado ao desenvolvimento da cultura ou manejo eficiente do campo.

De acordo com Curi *et al.* (1993), o adensamento é um processo onde há a redução natural do espaço poroso e consequente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química. Para Reichert *et al.* (2007), a compactação é o resultado da ação antrópica e o adensamento é um fenômeno natural.

A compressão é definida por Roloff (1986) *apud* Sautter (2001), como sendo a redução do volume do solo causada por uma carga externa, ocorrendo primariamente devido à exclusão do ar e da água dos espaços porosos e ao arranjo das partículas do solo e secundariamente devido à compressão e deformação do ar e da água nos poros.

3.2.2. Fatores de influência

3.2.2.1. Matéria orgânica do solo

O teor de matéria orgânica é caracterizado como um dos fatores responsáveis pela manutenção das condições físicas do solo e também influencia a resposta dos solos à compactação (ASSOULINE *et al.*, 1997; DIAS JÚNIOR *et al.*, 1999). O uso de coberturas mortas ou fertilizantes orgânicos que venham a promover a manutenção e o aumento de matéria orgânica no solo são importantes aliados contra o processo de compactação (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

O elevado teor de matéria orgânica promove um aumento no limite de plasticidade dos solos, dificultando o aumento de sua densidade, mesmo após o trânsito de máquinas e implementos pesados (FERNANDEZ-MEDINA, 1985). A matéria orgânica, segundo Tisdall e Oades (1982) *apud* Silva *et al.* (2007), atua no aumento da estabilidade de agregados, devido ao seu efeito de agregação dos constituintes minerais do solo. Essa estabilidade de agregados mantém as propriedades físicas do solo diante de fatores adversos, como a colheita e o cultivo mecanizados, sendo esse o interesse de vários pesquisadores (LEVY e MILLER, 1997), uma vez que ela se correlaciona bem com a permeabilidade e a resistência do solo à erosão hídrica. Reichert *et al.* (2007) citam que os efeitos da matéria orgânica são mais pronunciados em solos arenosos, sendo estes mais susceptíveis à alteração de sua estrutura, contudo, sua recuperação é mais rápida em relação aos solos argilosos.

3.2.2.2. Textura do solo

A composição da textura do solo interfere diretamente no processo de compactação. Quando determinada pressão externa é aplicada por máquinas, equipamentos de transporte ou animais ocorre um novo acomodamento e/ou arranjo das partículas, diminuindo o espaço poroso do solo, incrementando a densidade, a resistência à penetração e, conseqüentemente, aumentando a compactação (SOANE, 1986; HORN e LEBERT, 1994).

Solos com diferentes classes texturais apresentam comportamentos distintos, quanto às propriedades físicas, quando submetidos à compactação (LARSON *et al.*, 1980). Assim, supõe-se que os efeitos do tráfego de máquinas são mais pronunciados em solos de textura argilosa do que em solos de textura arenosa. No entanto, a recuperação de solos arenosos é mais demorada do que em solos de textura argilosa (FISHER e BINKLEY, 2000 *apud* AMPOORTER *et al.*, 2007).

Solos com estrutura grosseira apresentam maior atrito entre as partículas, dificultando a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação) (LIMA *et al.*, 2004). Solos formados por partículas de diferentes tamanhos, em geral, são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores (TORRES e SARAIVA, 1999 *apud* RICHART *et al.*, 2005). Maltoni (1994) e Carvalho Júnior (1995) *apud* Costa *et al.* (2002) destacam que estudos das relações entre as frações granulométricas do solo podem ser eficientes para explicar a formação de camadas adensadas e/ou compactadas no solo.

3.2.2.3. Umidade do solo

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.*, 2000).

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 (ALAKUKU *et al.*, 2003). Dias Júnior e Pierce (1996) consideraram que as operações mecanizadas utilizadas na colheita de madeira causaram prejuízos ao desenvolvimento das plantas, pelo fato de provavelmente não haver controle rígido do teor de água do solo ou da capacidade de suporte de carga no momento das operações. Para esses autores, o teor de água no momento em que o solo está sendo compactado tem grande influência na redução e redistribuição do espaço poroso. Os solos com baixos teores de água têm maior resistência à compactação do que solos úmidos.

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. Com o conteúdo de água acima da capacidade de campo, o aumento da umidade resulta em uma redução da densidade, podendo causar a perda da estruturação original do solo (WEAVER e JAMISON, 1951; BRAUNACK e DEXTER, 1978; SIDLE e DRLICA, 1981; SILVA, 1984; *apud* SEIXAS e OLIVEIRA JÚNIOR, 2001).

Segundo Thangavadileu (1994) *apud* Melo (2006), mudanças na densidade e na resistência do solo à penetração causadas pelo deslocamento de máquinas, dependem do teor de água no solo no qual essas ocorrem. De acordo com o autor, a compactação causada pelos rodados de tratores altera a estrutura do solo e reduz a porosidade total, resultando em baixa capacidade de retenção de água. Bowen (1981) *apud* Camargo (1999) relata que em solos de textura média a argilosa, quando submetidos a uma certa pressão em diferentes condições de umidade, houve aumento da compactação em aproximadamente 60 %, comparando-se condições secas e úmidas.

Em experimento de compactação de dois Latossolos com diferentes umidades, Oberhauser *et al.* (2002) verificaram que houve decréscimo da produção de matéria seca e do comprimento radicular de *Eucalyptus grandis*, cujos efeitos negativos foram mais pronunciados nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo durante a compactação. Já Silva *et al.* (2006), 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.

3.2.2.4. Camada de resíduos da colheita de madeira

A camada de resíduos da colheita de madeira distribui as pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas sobre o solo, assim influenciando no processo de compactação, como cita Wronski (1990) *apud* Seixas (2002a), o qual avaliou que camadas de resíduos florestais proporcionavam uma redução significativa na formação de sulcos e um aumento na resistência do solo ao tráfego das máquinas. O autor verificou que para cada 10 kg.m^{-2} adicionais de resíduos, colocados sobre outros 10 kg.m^{-2} , havia um aumento de 25 % na resistência do solo. Seixas *et al.* (1995) detectaram reduções significativas, ao redor de 40 % do incremento na densidade do solo sem cobertura, na compactação do solo devido ao tráfego de um *Forwarder* sobre camada de resíduos da colheita de madeira. Seixas *et al.* (1998) também constataram que a extração de madeira por trator agrícola, equipado com grua mais carreta, movimentando-se sobre casca, galhos e folhas de *Eucalyptus grandis* (10 kg.m^{-2}), reduziu 56 % em média da densidade do solo que poderia ocorrer no tráfego sobre o solo sem cobertura.

3.2.2.5. Peso da máquina

O peso da máquina é o fator que determina a profundidade da compactação do solo, independentemente da pressão aplicada na sua superfície (JORAJURIA e DRAGHI, 2000). Lima e Sirtoli (2006) citam que a distribuição do peso das máquinas sobre a superfície do solo explica o fato dos tratores com rodados de esteiras compactarem menos o solo em relação aos tratores com rodados de pneus. Tal fato ocorre devido a esteira ter maior superfície de contato com solo, exercendo, portanto, menor compressão por unidade de área e compactando menos o solo.

De acordo com Taylor *et al.* (1982) *apud* Silva *et al.* (2007), quando se trata de máquinas grandes, a carga aplicada por eixo parece exceder a influência da pressão do pneu na compactação, principalmente na camada superficial de 20 a 50 cm. Hakansson e Danfort (1981) consideram que cargas superiores a 6 toneladas por eixo podem causar significativa compactação abaixo de 40 cm.

Warkotsch (1994) verificaram que dependendo da relação carga/distribuição nas rodas dos veículos, a compactação de um solo pode chegar até 80 cm de profundidade, ressaltando-se que a compactação máxima situa-se na profundidade entre 30 e 55 cm.

3.2.2.6. Pressão no solo

As máquinas de colheita da madeira causam uma grande pressão sobre o solo, sendo sua atividade a fonte das principais forças causadoras da compactação em solos florestais (SEIXAS, 1997). Segundo Soenne (1958) *apud* Bacchi (1976), a distribuição da pressão no solo sob as rodas dos veículos irá depender de: a) peso do veículo, que irá determinar a força total sobre o solo; b) área de contato entre a roda e o solo, que irá determinar a pressão; c) distribuição da força na área de contato; e d) conteúdo de umidade e densidade inicial.

Dependendo da forma como realizam seu trabalho, os eixos das máquinas de colheita exercem diferentes pressões sobre o solo. Seixas (2000) observou que, geralmente, o eixo traseiro suporta maior carga do que o frontal, fato este relatado pelo autor, que estimou uma pressão de aproximadamente 26 kPa sob os pneus dianteiros e cerca de 80 kPa sob os pneus traseiros, na operação de um *Skidder* de 6,5 t com carga máxima.

Seixas (2000) ainda relata que os autores McNabb e Froehlich (1983) concluíram que a pressão máxima desenvolvida pela roda ou esteira, incluindo o peso das toras e efeitos da declividade na distribuição do peso, foi significativa na previsão da compactação do solo. Contudo, essa pressão era responsável por uma pequena parcela dessa variação, sendo que o número de passadas da máquina e uma medida de índice de cone da resistência inicial do solo eram variáveis de predição muito mais importantes.

3.2.2.7. Intensidade de tráfego

Segundo Raper e Erbach (1990), a distribuição da compactação no perfil do solo, se dá de acordo com a carga aplicada, a pressão exercida pelos rodados das máquinas, a umidade do solo e a intensidade de tráfego recebida.

O efeito da intensidade de tráfego já foi comprovado em muitos estudos, que constataram que o tráfego repetido em uma mesma área provoca danos à estrutura do solo, com conseqüente redução no rendimento na produção das culturas (HAKANSSON e REEDER, 1994; LAL, 1996).

De acordo com vários autores, a primeira passada é considerada aquela que induz as maiores mudanças na estrutura do solo, como confirmam McNabb e Froehlich (1983) *apud* Seixas (2000), que constataram que pelo menos 60 % do aumento esperado para a densidade em uma trilha onde ocorriam mais de 20 passadas, já aconteciam a partir de 3 a 5 passadas.

Seixas e Souza (1998) observaram que cerca de 80 % da compactação total do solo, ocorrida após 20 passadas de um trator mais carreta carregada de madeira, resultou das cinco primeiras viagens desse equipamento.

Raghavan e McKyes (1983) compararam a compactação produzida pelo número de passadas para diferentes tamanhos de pneus das máquinas. Os pneus menores produziram aumentos consideráveis na densidade do solo até a quinta passagem, enquanto os pneus maiores até a décima. No entanto, os autores concluíram que o efeito das passadas foi maior que o efeito dos tipos de pneus. Já Jakobsen e Greacen (1985), estudando a compactação causada por um *Forwarder* em solos com plantio de *Pinus sp.*, observaram que os valores de resistência do solo à penetração eram acrescidos de 0,2 a 0,3 MPa a cada passada da máquina, e que a densidade do solo aumentava e a condutividade hidráulica diminuía com o número de passadas. Já Collares (2005) descreve que a compactação causada por quatro passadas de uma máquina de 10 t, após um ano, reduziu a retenção de água até a camada de 20 cm de um solo arenoso.

3.2.2.8. Tipos e tamanho dos rodados

De acordo com Soane *et al.* (1981), tanto a pressão de inflagem quanto o tamanho dos pneus atuam na distribuição das forças sobre a área de contato com o solo. Já as forças na interface solo-pneu e a resistência apresentada pelo solo influenciam a magnitude e distribuição das tensões no solo sob as rodas.

Seixas (1997) relata que as operações de colheita com *Skidders* de pneus largos em áreas com maior teor de umidade causam danos devido à redução da drenagem e aeração do solo, mas em níveis menores quando comparado com o uso de pneus mais estreitos. Os pneus mais largos distribuem o peso da máquina sobre uma maior superfície de contato, resultando assim em menor pressão no terreno, ocasionando menor compactação do solo.

Perdok e Arts (1987) correlacionaram as características dos pneus com as propriedades do solo, observando que a capacidade de carga do pneu é fortemente dependente das suas dimensões, pressão de inflagem e tipo (radial ou diagonal).

Segundo Wiley *et al.* (1992) *apud* Seixas (1997), na pressão indicada um pneu tem o mais longo comprimento utilizável e a maior área de contato, resultando na maior capacidade de tração e menor pressão de contato no solo, enquanto em pressões menores o pneu sofre uma deflexão excessiva e prejudicial.

Lanças (2007) enfatiza que a calibragem correta do pneu diminui em até 20 % o consumo de combustível, há uma economia de 7,5 % no tempo consumido para a realização da atividade e diminui em até 80 % a compactação do solo.

Bygdén *et al.* (2003), afirmam que o uso de máquinas com rodados de semi-esteiras ou esteiras, reduzem 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.

3.2.3. Efeitos da compactação sobre o solo e as plantas

Muitos efeitos negativos da compactação sobre as características do solo e o desenvolvimento de plantas foram observados por diversos autores. De forma geral, o tráfego da maquinaria e a força de tração aplicada sobre a superfície do solo causam uma deformação na sua estrutura, podendo promover a movimentação das partículas, causando prejuízos à estrutura, constituição física e química do solo, e no crescimento das plantas (SILVEIRA, 2001).

Lima e Sirtoli (2006) citam que o processo de compactação do solo, independentemente do tipo, uso e manejo, tem alterado significativamente as condições físicas do solo (densidade, porosidade total e tamanho dos poros), e suas propriedades dependentes (aeração, infiltração, retenção e capacidade de armazenamento de água).

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.

Em relação a aeração, Ruark *et al.* (1982) *apud* Sautter (2001) mencionam que os problemas dessa propriedade são resultantes de mudanças na estrutura do solo, tendo como causa o realinhamento e a destruição de macroporos. Em solos adequadamente aerados, os gases se movem por difusão ou fluxo de massa causados por flutuações diurnas da temperatura, mudanças na pressão barométrica ou movimento horizontal da água. Difusão ou movimento de gases na atmosfera do solo podem ser facilmente interrompidos pela alteração da estrutura do solo nos horizontes superficiais. Diminuição no espaço macroporoso devido à compactação pode restringir a difusão de CO₂ para fora do solo e a entrada de O₂.

Sands *et al.* (1979) constataram que um aumento na proporção de microporos fez com que o solo agisse como se fosse de textura fina. O teor de água volumétrica à capacidade de campo é aumentado, crescendo assim o volume de água por unidade de volume de solo que está disponível às raízes das árvores. Ohu *et al.* (1985) acrescentam que, apesar do aumento do volume de água à capacidade de campo, geralmente não há aumento do crescimento das plantas devido aos efeitos adversos na estrutura e aeração do solo causados pela compactação. Hill e Summer (1967) *apud* Sautter (2001) demonstraram que a compactação contínua chega a um ponto onde a redução da porosidade total domina o crescimento relativo na proporção de microporos, sendo que após isto o teor de água volumétrica à capacidade de campo se torna menor.

O efeito da compactação na condutividade hidráulica e na infiltração pode ser predito pela mudança no tamanho e geometria dos espaços entre as partículas do solo. A compactação geralmente reduz a infiltração e a condutividade hidráulica saturada (REICHERT, 2007). Porém, devido ao fato de que a compactação aumenta a proporção de microporos, a redução da condutividade hidráulica não-saturada é menos evidente que a da saturada, e pode até ocorrer um aumento na condutividade hidráulica não-saturada (SANDS *et al.*, 1979). Warkentin (1971) *apud* Sautter (2001) afirma que a capacidade de campo é determinada pela distribuição da microporosidade e pela condutividade hidráulica não-saturada e é arranjada entre as camadas.

Outro efeito direto da redução da infiltração de água no solo se refere à erosão hídrica. Constantini *et al.* (1997) citam que alterações associadas ao fluxo de água em solos compactados, há aumento do escoamento superficial, tornando, assim, susceptível ao aparecimento de erosão, e reduzindo o armazenamento de água no solo. Reinert *et al.* (2006) destacam que a redução da infiltração de água ocasiona a erosão a qual carrega matéria orgânica, íons e produtos químicos associados aos sólidos do solo transportados.

Em relação aos efeitos da compactação sobre o crescimento de plantas, Fernandez *et al.* (1995) observaram que os danos no solo, ocasionados por equipamentos de extração de madeira, apresentaram efeitos negativos sobre a produtividade de *Pinus taeda* aos quatro anos de idade. Moehring e Rawls (1970) relataram que a compactação reduziu a sobrevivência de árvores em áreas replantadas em até 57 %. Já Lockaby e Vidrine (1989) *apud* Camargo (1999) constataram reduções significativas no crescimento em altura de uma floresta de *Pinus taeda*, variando entre 40 e 60 %, apesar da compactação do solo ter-se restringido apenas nos

5 cm próximos à superfície de solo. Worrel e Hampson (1997) ao avaliarem o crescimento de árvores em solos compactados, devido o tráfego de máquinas florestais, constataram que o crescimento em altura foi reduzido de 13 a 50 % e o volume na ordem de 10 a 20 %. Smith (1995) *apud* Camargo (1999) relata que a compactação afetou significativamente o crescimento de *Eucalyptus grandis* (15,5 %), *grandis X camaldulensis* (12,3 %) e *grandis X urophylla* (16,2 %).

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.

A compactação pode reduzir a macroporosidade em níveis que o crescimento ou mesmo a sobrevivência das raízes é determinada pela disponibilidade de oxigênio quando o solo está úmido. Isto ocorre quando a necessidade de oxigênio para a respiração no solo excede a razão pela qual o oxigênio no ar do solo pode ser repostado pela atmosfera (GREACEN e SANDS, 1980). Teepe *et al.* (2004) constataram que a compactação pode implicar numa redução da porosidade total em 20 % e uma diminuição de 50 a 60 % na quantidade de macroporos em favor dos pequenos poros. Heilman (1981) *apud* Camargo (1999) cita que a porosidade do solo restritiva para o crescimento de raízes de mudas de *Pseudotsuga menziesii* variou de 27 a 30 %.

Quando uma raiz encontra no solo um poro de diâmetro menor que o seu, ela se expandirá somente se for capaz de exercer suficiente pressão para dilatar o poro. Além disso, o impedimento no crescimento da raiz principal em solo compactado faz com que as plantas expandam as raízes laterais (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Nessa direção, Mósená e Dillenburg (2004) verificaram alterações na morfologia da raiz de *Araucaria angustifolia*, com raízes superficiais, raízes laterais finas e comprimento da raiz principal reduzido. Misra e Gibbons (1996) reportaram uma redução no comprimento das raízes primárias e laterais de eucalipto na ordem de 71 e 31 %, respectivamente, com um aumento na resistência do solo à penetração de 0,4 para 4,2 MPa.

Silva *et al.* (2006), detectaram redução da produção de matéria seca de raízes e da densidade radicular de *Eucalyptus urophylla* pela compactação em vasos com diferentes solos e umidades. Wasterlund (1985) verificou que as raízes secundárias de *Picea albis* e *Pinus sylvestris* parecem ser mais afetadas pela compactação do solo do que as raízes primárias.

3.2.4. Atributos físicos do solo

3.2.4.1. Densidade do solo

A densidade do solo é definida pela razão entre massa de sólidos e volume do solo (volume de sólidos mais espaço poroso). É também referida como densidade de solo seco ou densidade aparente (BLAKE e HARTGE, 1986; LAL e SHUKLA, 2004). Esta é uma das mais importantes propriedades do solo, considerada como um dos indicadores da qualidade física de um solo, sendo amplamente utilizada para avaliar outras propriedades do solo (MACYK e RICHENS, 2004; CHAN, 2006).

Muitos métodos têm sido propostos para medir a densidade do solo, podendo ser classificados em dois grupos. O primeiro requer a remoção de um volume conhecido de solo estruturado, sendo os seguintes métodos: o do anel volumétrico (UHLAND, 1949 *apud* ALMEIDA, 2008; PRIKNER *et al.*, 2004); do torrão parafinado (SHAW, 1917 *apud* ALMEIDA, 2008; SANDER e GERKE, 2007); e o da escavação (ISRAELSEN, 1918 *apud* ALMEIDA, 2008; HIRMAS e FURQUIM, 2006). O segundo grupo é representado por métodos que envolvem o uso de radiação nuclear, como atenuação de raios gama (TIMM *et al.*, 2005).

A densidade pode expressar o grau de impedimento mecânico que restringe ou inibe o crescimento das raízes (TAYLOR e GARDNER, 1963). Para o mesmo solo, quanto mais elevada for a densidade, maior será o seu nível de compactação, menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão as restrições ao desenvolvimento das plantas e ao preparo do solo, levando a maiores consumos de energia (COSTA *et al.*, 2002).

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).

Segundo Tormena *et al.* (1998b), a densidade do solo também é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros. Essas alterações influenciam nas propriedades físico-hídricas, tais como: porosidade de aeração, retenção de água no solo, disponibilidade de água para as plantas e resistência do solo à penetração.

Em relação a valores críticos de densidade do solo, Geist *et al.* (1989) sugerem que incrementos acima de 15 % no valor de densidade inicial do solo, podem ser considerados como críticos ao desenvolvimento radicular de plantas. No Brasil, várias pesquisas procuraram encontrar um valor crítico de densidade para diversos solos. Numa tentativa de reunir esses valores e estabelecer um padrão de valor crítico de densidade, Reinert *et al.* (2006), a partir de dados de intervalo hídrico ótimo obtidos em vários artigos, dissertações e teses publicados, apresentaram duas equações para estimativa, uma relacionando a densidade crítica (D_{sc} IHO) e o teor de argila, e a outra relacionando a densidade do solo restritiva (D_{sc} Rest) e o teor de argila, como seguem a seguir:

$$D_{sc\text{IHO}} = - 0,00072 \text{ Teor de Argila} + 1,79321 \quad (R^2 = 0,87)$$

e

$$D_{sc\text{Rest}} = - 0,00070 \text{ Teor de Argila} + 1,86045 \quad (R^2 = 0,83)$$

onde:

$D_{sc\text{IHO}}$ = densidade do solo crítica ($g.cm^{-3}$); $D_{sc\text{Rest}}$ = densidade do solo restritiva ($g.cm^{-3}$);
 Argila = teor de argila ($g.kg^{-1}$).

De acordo com Reichert *et al.* (2007), pode-se considerar que a densidade crítica (D_{sc} IHO), seja um alerta de que medidas preventivas ou recuperadoras devem ser tomadas para que a densidade não aumente, tornando-se, dessa forma, restritiva (D_{sc} Rest). Vale ressaltar que o valor de densidade crítica (D_{sc} IHO), resultante da relação com o teor de argila, sempre será menor do que o valor considerado para a densidade restritiva (D_{sc} Rest).

Muitos pesquisadores têm estudado os efeitos da alteração da densidade, como Sands (1982) que avaliou a densidade do solo sob plantações de *Pinus radiata*, constatando que os valores obtidos eram superiores aos sítios sob floresta nativa ou pastagem, e estes valores se estendiam pela segunda rotação de forma cumulativa.

Froehlich *et al.* (1986) *apud* Camargo (1999) relataram que o crescimento em altura e diâmetro de *Pinus ponderosa* mostrou-se fortemente influenciado pelo aumento da densidade de 7,1 % e decréscimo na porosidade em 11,8 %. Corns (1988) verificou que o aumento em

densidade de 1,30 para 1,50 g.cm⁻³, gerou reduções de aproximadamente 48 % no comprimento de raízes, 15 % no crescimento em diâmetro e 17 % para a altura de mudas de *Pinus sp.* Clayton *et al.* (1987) concluíram que aumentos de 10 a 20 % na densidade do solo provocaram variabilidade de crescimento em altura de *Pinus ponderosa*, reduzindo a produção em torno de 20 %.

3.2.4.2. Porosidade total

O solo é um sistema tridimensional complexo, onde a porosidade é uma fração volumétrica ocupada por ar e/ou água, representando o local onde circulam a solução (água e nutrientes) e o ar. É, portanto, o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo, que são importantes para o desenvolvimento das plantas (HILLEL, 1970; LAURANI *et al.*, 2004)

Segundo Costa *et al.* (2002) a porosidade total pode ser dividida em macro e microporos. Para os autores essa definição é arbitrária, mas lógica. Ela se baseia no fato do solo ser um emaranhado de capilares de diferentes formas, arranjos e diâmetros, e que a água retida em capilares maiores (macroporos) tendem a deixar o solo rapidamente sob drenagem livre, enquanto aquela retida nos capilares menores permanecem em equilíbrio com as forças de adsorção e capilaridade no solo – potencial matricial (BAVER e GARDNER, 1973; REICHARDT, 1996 *apud* COSTA *et al.*, 2002).

Para um bom desenvolvimento radicular e aéreo da planta, é necessário um volume de poros adequado. Porém, há uma redução de tamanho dos poros com a compactação, conduzindo a uma maior retenção de água e, portanto, a uma troca gasosa restrita, sendo esta última decorrente da diminuição da porosidade total (BALLARD, 2000)

Camargo e Alleoni (1997) apresentaram a compactação do solo como uma das limitações ao cultivo das plantas, podendo provocar o crescimento deficiente do sistema radicular. A compactação ocorre às expensas da diminuição dos poros do solo com aumento de sua densidade. Os poros mais afetados são os de tamanho maiores, por onde processa quase todo o fluxo de ar e água e por onde as raízes crescem com maior facilidade. Stone *et al.* (2002) observaram que, em estudo em vasos com Latossolo Vermelho, houve transformação de macroporos em microporos decorrente da compactação.

A distribuição do diâmetro dos poros e sua continuidade condicionam o desenvolvimento radicular por estarem diretamente relacionadas ao volume de ar e de água e,

indiretamente, à resistência à penetração das raízes, determinando a capacidade de transporte de oxigênio (LIPIEC e HATANO, 2003).

Estudando um Latossolo Vermelho, Stone *et al.* (2002) relatam que a porosidade total e a macroporosidade diminuíram linearmente com o aumento da densidade do solo. Kertsmann (1996) relata que ao diminuir o volume de macroporos, parte da água fica retida nos microporos a uma alta tensão, ficando indisponível para as plantas. Já Secco *et al.* (2004), estudando um Latossolo Vermelho-Escuro, mostraram que houve relação direta entre a densidade e a microporosidade do solo, observando que nas camadas com maiores valores de densidade do solo ocorreram maiores valores de microporos, e a relação entre a densidade e a macroporosidade foi inversa.

3.2.4.3. Resistência mecânica do solo à penetração

A compactação do solo pode ser caracterizada por meio da resistência do solo à penetração, a qual pode ser avaliada por meio de penetrógrafos ou penetrômetros (REINERT *et al.*, 2007) e que está diretamente relacionada ao crescimento radicular das culturas (PEDROTTI *et al.*, 2001; BEUTLER *et al.*, 2002).

A resistência do solo à penetração é uma medida que traz vantagem devido à rapidez com que se pode obter um grande número de dados, porém, ela varia com a umidade e a densidade do solo. Além disso, a resistência também está associada à característica estrutural dos agregados, sendo que a porosidade do solo é a melhor variável para explicar que a resistência depende da estrutura e da umidade do solo (GONZALEZ, 1991; GOMES e PENA, 1996).

De Maria *et al.* (1999) relatam que a resistência à penetração apresentou melhores resultados do que a densidade do solo para caracterizar a compactação entre as camadas de solo. Streck *et al.* (2004), avaliando a compactação pela porosidade total, densidade do solo e a resistência à penetração, observaram que essa última melhor evidenciou o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo. Por isso, talvez essa determinação seja mais sensível que a densidade e porosidades do solo na detecção de diferenças (ABREU *et al.*, 2004).

A resistência mecânica inicial do solo é função de forças opostas: aquelas que trabalham para naturalmente consolidar o solo (coesão) e aquelas que tendem a soltá-lo (adesão). Como resultado, não existe uma relação simples entre a resistência e a densidade do solo (BARLEY e GREACEN, 1967 *apud* SEIXAS, 2002a).

Segundo ROSOLEM *et al.* (1999), solos com conteúdo de argila acima de 40 % têm maior resistência à penetração, enquanto que em solos arenosos, o incremento da resistência em função da compactação é menos acentuado.

Muitos autores citam vários valores críticos de resistência à penetração, no entanto, a maioria desses valores variam de 1,5 a 4,0 MPa (ROSOLEM *et al.*, 1999), sendo 2,0 MPa aceito como um valor que impede o crescimento radicular (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a). Para Zou *et al.* (2000) o valor limite para o desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais é 3 MPa (RP restritiva).

Porém, vale ressaltar que a relação entre o crescimento da raiz e a resistência do solo ainda não foi estabelecida para diversas espécies florestais. Essa depende do tipo de solo, das características do penetrômetro e, também, da própria espécie (SANDS *et al.*, 1979; GREACEN e SANDS, 1980).

De acordo com Davies e Zhang (1991) *apud* Cechin (2007), vários estudos ressaltam a importância de se avaliar os atributos físicos do solo, uma vez que as raízes das plantas que crescem sob condições de estresse parecem ser capazes de identificar essas condições e de enviar sinais para a parte aérea, que controla a expansão foliar.

3.2.5. Medidas mitigadoras da compactação do solo

Diversas medidas para atenuar e prevenir os efeitos nocivos da compactação do solo causado pelo tráfego de máquinas de colheita de madeira têm sido sugeridas, como: aumento do diâmetro e largura dos pneus, rodados duplos, maior distribuição do peso da máquina, redução da pressão de contato solo - pneu, menor pressão de ar no pneu, restrição de tráfego em áreas úmidas e tráfego sobre camada de resíduos (SEIXAS *et al.*, 1995; SEIXAS *et al.*, 1998).

Fenner (1996) cita que a restrição do tráfego de máquinas no interior do talhão, principalmente em condições úmidas, redução das trilhas de tráfego, tráfego sobre a galhada, transporte de menores cargas são medidas que procuram evitar a ocorrência dos distúrbios no solo. 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, (FERNADES E SOUZA, 2003; LIMA *et al.*, 2008), são algumas medidas que vêm sendo adotadas para minimizar o problema da compactação em solos florestais.

Horn *et al.* (2004) mencionam ser nula a possibilidade de as máquinas utilizadas na colheita florestal não causarem sérios danos estruturais e compactação dos solos. Os autores ressaltam que a única solução funcional, que atenderia às exigências da indústria florestal moderna e ao uso sustentável do solo, seria estabelecer canais permanentes de tráfego localizados em áreas compactadas que permaneceriam utilizadas durante todas as atividades florestais.

Segundo Sauder (1985) *apud* Oliveira Júnior (1998), deve-se programar as operações, planejar a locação dos carregadores e treinar os operadores, para minimizar os impactos ambientais. O autor afirma, ainda, que os cuidados para minimizar os impactos ambientais da colheita devem ser observados testando quais os impactos causados pelos diferentes sistemas, buscando configurações de máquinas e pneus que evitem tais danos aos solos.

Oliveira *et al.* (1998) citam algumas medidas de caráter preventivo, como escolha de espécies com sistema radicular capaz de penetrar em solos compactados, aproveitamento de restos culturais e adubação orgânica que melhoram a estrutura e o teor de matéria orgânica do solo, e o controle do tráfego, restringindo a movimentação de máquinas na área. Outras práticas, citadas pelo autor, consistem na realização das operações preferencialmente em épocas mais secas e no uso de métodos de preparo do solo, revolvendo o solo e propiciando melhores condições para a implantação de mudas florestais.

Hakansson e Reeder (1994) salientam que existem várias técnicas capazes de reduzir a compactação do solo, entretanto, sua utilização normalmente é de custo elevado e raramente são capazes de corrigir totalmente os efeitos negativos da compactação. Os autores recomendam ser mais interessante evitar a compactação através da minimização do carregamento mecânico sobre o solo, do que periodicamente descompactá-lo. Salientam ainda que, caso sejam aplicadas cargas excessivas após feita descompactação do solo, este novamente apresentará compactação subsuperficial.

3.2.6. Modelagem da compactação do solo

A modelagem tem apresentado grande potencialidade para o entendimento do processo de compactação dos solos. Segundo Defossez *et al.* (2002), a modelagem é uma técnica potencialmente útil para ajudar a compreender e manejar os solos cultivados com altos níveis produtivos sem danos ao ambiente.

De acordo com Gupta e Raper (1994) diversas pesquisas tratam da modelagem da compactação do solo pelo tráfego de máquinas, entretanto, mais pesquisas são necessárias para que os modelos sejam aceitáveis e utilizados rotineiramente.

Segundo O'Sullivan e Simota (1995), os modelos de estimativa da compactação do solo podem ser classificados em dois grupos:

- **Mecanísticos:** são modelos que simulam os processos que representam a compactação pelo tráfego de máquinas, por meio de equações matemáticas definidas analiticamente;
- **Empíricos:** são modelos que descrevem as relações entre entradas e saídas e não tratam dos processos envolvidos, utilizando relações entre os parâmetros do solo e/ou da máquina para estimar os atributos do solo relacionados à compactação.

Na literatura, vários são os modelos ou funções, principalmente empíricos, que buscam estimar a compactação dos solos incorporando os seus atributos físicos de influência (BUSSCHER, 1990; CARTER, 1990; ASSOULINE *et al.*, 1997; SMITH *et al.*, 1997; IMHOFF *et al.*, 2000; RIBON e TAVARES FILHO, 2004; LIMA *et al.*, 2007). Contudo, pesquisas vêm mostrando que essas relações não são tão simples quando avaliadas em condições de campo (RIBON, 2004; RIBON e TAVARES FILHO, 2004).

Dias Júnior e Pierce (1995) desenvolveram um modelo não-linear que permite determinar a pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional, baseando-se em diferentes umidades de solos de regiões temperadas.

Kondo (1998), utilizando o modelo desenvolvido por Dias Júnior e Pierce (1995), demonstrou que a compressibilidade do solo é influenciada pelo sistema de manejo. Em estudos da capacidade de suporte ou compressibilidade do solo, Dias Júnior (1994) sugere a utilização de modelos de compressibilidade com base na pressão de preconsolidação, que predizem a máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional, fornecendo, portanto, informações para a prevenção da compactação.

Canarache (1990) desenvolveu um modelo que considera a resistência à penetração dependente da textura e densidade do solo, sendo que a umidade não foi incluída no modelo pelo fato de as amostras terem sido mantidas em igual teor de água.

Busscher (1990) desenvolveu um modelo não-linear que utiliza a umidade volumétrica e a densidade do solo, na estimativa da resistência à penetração,. Muito pesquisadores vêm

utilizando esse modelo para estudos de compactação do solo (SILVA *et al.*, 1994; SILVA, 2003; BARRETO RIQUELME, 2004; COLLARES *et al.*, 2006).

Silva (2003) relata que o modelo não-linear proposto por Busscher (1990) melhor relacionou o efeito da densidade e a umidade com a resistência à penetração, comparado à modelos lineares que relacionavam a resistência à penetração com a umidade. Lima *et al.* (2007), usando modelo não-linear de Busscher (1990), viram que com a diminuição da umidade e aumento da densidade do solo, ocorreu aumento da resistência à penetração, enquanto com o aumento da umidade e diminuição da densidade ocorria a redução da resistência à penetração.

4. CAPÍTULO I

INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA COMPACTAÇÃO DE SOLOS SUBMETIDOS AO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA

4.1. INTRODUÇÃO

O processo de mecanização possibilitou uma evolução significativa na produtividade e qualidade das atividades realizadas para o cultivo das florestas, entretanto, tem sido grande responsável por impactos ambientais nas áreas florestais. Dentre os principais impactos observados sobre o ecossistema florestal, destaca-se a compactação do solo, a qual é resultado do tráfego intenso de máquinas, principalmente, nas operações de colheita da madeira.

Segundo Seixas (1988), a compactação consiste na ação de agregação das partículas do solo, que por sua vez, reduz o volume por elas ocupado. Trata-se de uma tensão aplicada sobre o solo resultando em mudanças em termos de incremento da densidade, redução do espaço poroso, infiltração e movimento interno de água de forma mais lento, além de maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes.

Esse efeito é maior conforme as condições de umidade do solo, sendo que esta situação pode tornar-se mais crítica devido ao tráfego indiscriminado e sem controle na área, podendo ter como consequência a disseminação da compactação ao longo dos anos, reduzindo a produtividade do sítio, aumentando os níveis de erosão e gerando perdas de produtividade.

Segundo Lanças *et al.* (2005), não é conveniente realizar certas operações mecânicas em determinados teores de água no solo. Mantovani (1987) ressalta que quanto maior o teor de água, maior será a compactação do solo, sendo que a umidade mais crítica a favorecer a compactação corresponde à faixa próxima da capacidade de campo. Dias Júnior (1994) diz que em condições de elevada umidade, o solo fica suscetível à compactação devido à sua baixa capacidade de suporte de carga.

De acordo com Froehlich (1977), a deformação do solo produzida pela primeira passada de uma máquina em condições de solo úmido, é equivalente àquela produzida após quatro passadas num solo seco. Para o autor, o mais importante é determinar os níveis aceitáveis de impacto para cada condição e gerenciá-las. Dessa forma, é possível reduzir os efeitos nocivos da compactação, impondo limites em que se pode trafegar com as máquinas, de acordo com os níveis de teor de água no solo.

Outra solução para este problema, conforme Horn *et al.* (2004), seria um tráfego controlado, de tal modo que se mantenha a área mais favorável para o crescimento das plantas, restringindo a compactação do solo para as faixas de trânsito.

Portanto, 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 condições de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e, assim a compactação do solo pode não ser significativa.

Porém, é importante ressaltar que não é somente a umidade do solo que determina sua susceptibilidade às alterações causadas pelo tráfego das máquinas. Outros fatores também são decisivos sobre o comportamento do solo e sua resistência à compactação, dentre os quais se destacam o tipo e a textura do solo, e o teor de matéria orgânica (EKWUE E STONE, 1995; DIAS JÚNIOR E PIERCE, 1996). Incerti *et al.* (1987) destacam a necessidade de se quantificar os efeitos e a duração da compactação para os vários tipos de solos, de modo a determinar o quanto são suscetíveis à compactação.

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

Este trabalho teve por objetivo avaliar a influência da umidade na compactação de duas classes de solos submetidos ao tráfego de máquinas de colheita da madeira em povoamento de *Pinus taeda* L., e verificar as relações entre as propriedades físicas dos solos e desenvolver modelos para estimativa da compactação.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Caracterização da área de estudo

4.2.1.1. Localização e clima

Esta pesquisa foi conduzida em áreas operacionais de colheita de madeira na Fazenda Cerro Azul B, pertencentes à empresa Battistella Florestal, localizada no município de Dr.

Pedrinho, Norte do Estado de Santa Catarina, entre os paralelos 26°42'52'' S e 49°29'00'' W, e altitude média de 530 m. O clima da região, segundo KÖPPEN, é classificado como mesotérmico úmido (Cfb), sem estação seca, com verões quentes e inverno rigoroso, sendo a temperatura média anual de 19,7 °C e precipitação média anual entre 1.600 a 1.700 mm (GAPLAN, 1986).

4.2.1.2. Histórico, solos e povoamento florestal

De acordo com a empresa, a área de estudo tem o histórico de ter sido utilizada no passado para fins produção agropecuários, havendo campos de pastagens antes de ser incorporada ao sistema de produção florestal.

Os solos da área foram classificados como sendo um Cambissolo Húmico Aluminíco típico (CHa) de textura franco-argilo-arenosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado, e um Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh) de textura franco-argilo-arenosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado. A classificação dos solos foi realizada pela própria empresa, e conferida a campo através da abertura de perfis.

Em cada solo avaliado, foram coletadas cinco amostras deformadas com o uso de um trado holandês, nas profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, para determinação da granulometria e do teor de carbono orgânico. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) e o teor de carbono orgânico pelo método de Walkley-Black. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Os dados de granulometria e de teor de carbono orgânico dos solos da área de estudo, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria e teor de carbono orgânico (C-org) para os solos e profundidades avaliadas.

Profundidades (cm)	Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)			
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	C-org (g.dm ⁻³)
0 — 15	647,0	133,0	220,0	21,03
15 — 30	634,3	153,7	212,0	20,25
30 — 50	640,2	59,8	300,0	18,31
Profundidades (cm)	Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh)			
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	C-org (g.dm ⁻³)
0 — 15	633,4	204,6	162,0	26,80
15 — 30	630,0	184,0	186,0	32,83
30 — 50	650,0	16,0	334,0	28,81

Os dados referentes às características do povoamento florestal da área de estudo estão discriminados na Tabela 2.

Tabela 2. Características do povoamento florestal da Fazenda Cerro Azul B.

Espécie	<i>Pinus taeda</i> L.
Idade de corte (anos)	± 35
Área basal (m ² .ha ⁻¹)	45,82
Número médio de árvores/ha	442
DAP médio (cm)	36,10
Altura média (m)	29,43
Volume médio individual (m ³)	1,48
Volume médio/ha (m ³ .ha ⁻¹)	654,35
Peso médio individual (t)	0,89

4.2.1.3. Sistema de colheita da madeira

A empresa utilizava o sistema de colheita de Árvores Inteiras (*Full-tree*), onde o corte e o empilhamento das árvores em feixes era realizado por um trator florestal *Feller-buncher* (Figura 1), prosseguindo com a extração das árvores até beira da estrada por um trator florestal *Skidder* (Figura 2), o qual trafegava de maneira irregular dentro do talhão, sem restrições, sendo em seguida realizada a operação de desgalhamento das árvores com o uso de motosserras (Figura 3) e, por fim, o processamento das árvores com o uso de um Processador Florestal (Figura 4). A Tabela 3 apresenta maiores detalhes em relação às características das máquinas de colheita da madeira.



Figura 1. Trator florestal *Feller-buncher*.



Figura 2. Trator florestal *Skidder*.



Figura 3. Desgalhamento com motosserra.



Figura 4. Processador Florestal.

Tabela 3. Características das máquinas de colheita da madeira.

Máquina (Operação)	Especificações e Características
<i>Feller-buncher</i> (Corte e empilhamento)	Marca <i>Caterpillar</i> , modelo 522, motor <i>Caterpillar</i> C9 ACERT (Diesel), potência nominal de 263 hp / 196,1 kW, peso operacional de até 30,4 t, rodados de esteiras.
<i>Skidder</i> (Arraste)	Marca <i>Caterpillar</i> , modelo 545, motor <i>Caterpillar</i> 3306 DITA (Diesel), potência nominal de 225 hp / 168 kW, peso operacional de até 18,2 t, rodados de pneus (pressão de 42 psi / 290 kPa) recobertos com semi-esteiras (marca <i>Eco Wheel Track</i>) na parte dianteira e tração de 4 X 4, garra com capacidade de 1,5 m ² , distância média de arraste de 75 m, e transporte médio de 3,55 t/ciclo de arraste.

4.2.2. Procedimento amostral

A coleta de dados foi realizada no período de abril a setembro de 2009, sendo feita em diferentes períodos, em talhões próximos em cada solo avaliado, durante condições secas e

chuvosas, de acordo com a precipitação pluviométrica, procurando contemplar distintas umidades nos solos. Após a coleta, foi realizada uma classificação dos dados, em função de analisar diferentes classes de umidade de gravimétrica dos solos. Os dados foram distribuídos em função das seguintes classes: Ug1 ($U_g < 0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$); Ug2 ($0,30 \leq U_g < 0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$); Ug3 ($U_g \geq 0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$).

A amostragem do solo foi feita por meio da instalação de parcelas amostrais de 10 X 25 m, alocadas em relação às linhas de tráfego das máquinas de extração (*Skidder*) (Figura 5), sendo localizadas ao acaso com distribuição de modo a representar áreas próximas às estradas, no meio do talhão e mais distantes, procurando abranger diferentes intensidades de tráfego, contudo sem haver controle do tráfego, mantendo-se também as mesmas condições de relevo, com a finalidade de diminuir a variabilidade natural do solo.

Em cada parcela foram coletadas amostras indeformadas de solo buscando-se concentrar nos sulcos formados pela passagem dos rodados da máquina de extração (após tráfego), e em locais próximos, distante 2 m da linha de tráfego, em solo não perturbado (sem tráfego), conforme Figura 5. As amostras foram coletadas em cinco pontos equidistantes 4 m entre si, nas profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm.

Ressalta-se que o uso desse esquema de amostragem, foi devido a dificuldade de se determinar previamente as trilhas de passagem do *Skidder*.

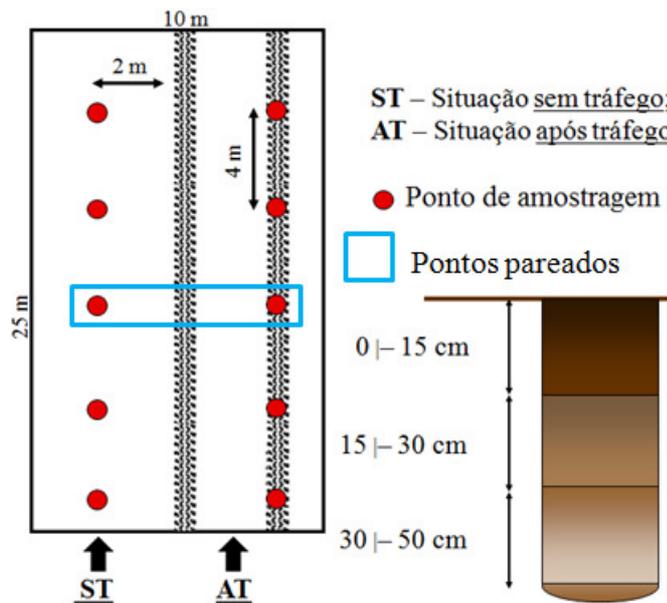


Figura 5. Esquema da coleta de amostras indeformadas de solo nas parcelas e profundidades.

No total foram instaladas e amostradas 14 parcelas no Cambissolo Húmico Aluminíco típico (CHa) e 10 parcelas no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh), sendo que em cada parcela foi realizada a coleta em local sem tráfego (ST) e após tráfego (AT), totalizando 30 amostras por parcela (5 pontos amostrais X 3 profundidades X 2 locais de coleta). A distribuição dos dados em classes de umidade gravimétrica, foi realizada em função do pareamento dos dados, correspondentes ao local sem tráfego (ST) e após tráfego (AT), por local de amostragem dentro da parcela (Figura 5), sendo utilizado o valor médio de umidade dos pontos pareados na classificação.

O número de amostras (N) por classe de umidade gravimétrica e profundidade após a classificação dos dados, está detalhada na Tabela 4, lembrando que foi considerada a quantidade total de amostras coletadas (ST + AT).

Tabela 4. Número de amostras (N) por classe de umidade gravimétrica e profundidade nos solos avaliados.

Profundidades (cm)	Classes de Umidade Gravimétrica (kg.kg ⁻¹)		
	Ug1 (Ug < 0,30)	Ug2 (0,30 ≤ Ug < 0,40)	Ug3 (Ug ≥ 0,40)
Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)			
0 ─ 15	38	68	34
15 ─ 30	40	72	28
30 ─ 50	70	44	26
Total	148	184	88
Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh)			
0 ─ 15	28	50	22
15 ─ 30	26	40	34
30 ─ 50	18	52	30
Total	72	142	86

As coletas foram realizadas após finalizadas as operações de colheita de madeira, seguindo o ritmo normal de trabalho da empresa, sem haver nenhuma interferência. Todas as amostras de solo foram identificadas e acondicionadas em embalagens plásticas herméticas,

visando-se preservar as condições de campo, sendo em seguida transportadas para a realização das análises.

4.2.3. Análises físicas do solo

4.2.3.1. Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico, com o uso de anéis com volume de 100 cm^3 , que foram introduzidos verticalmente no perfil de solo até as profundidades avaliadas por meio de um trado para amostras indeformadas (TAI), marca *Soil Control* (Figura 6).

Após a coleta, as amostras de solo foram pesadas, para obtenção do peso úmido, colocadas em estufa por 24 horas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, e novamente pesadas, para obtenção do peso seco. A densidade do solo foi obtida pela fórmula abaixo, segundo a metodologia da EMBRAPA (1997):

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s}$$

onde:

D_s = densidade do solo (g.cm^{-3}); M_{ss} = peso da amostra seca a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (g); V_s = volume do anel (cm^3).



Figura 6. Trado para amostras indeformadas (TAI), marca *Soil Control*.

4.2.3.2. Porosidade total do solo

A porosidade total do solo (P_t) foi determinada para os mesmos pontos e profundidades da densidade do solo, sendo os valores foram obtidos conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), com uso da expressão abaixo, lembrando que a densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico.

$$P_t = \frac{D_p - D_s}{D_p}$$

onde:

P_t = porosidade total ($m^3.m^{-3}$); D_p = densidade de partículas do solo ($Mg.m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($Mg.m^{-3}$).

4.2.3.3. Umidade gravimétrica do solo

A umidade gravimétrica do solo (U_g) foi obtido pela relação entre a massa de água e a massa total de solo da amostra seca, conforme metodologia da EMBRAPA (1997), pelo uso da seguinte expressão:

$$U_g = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}}$$

onde:

U_g = umidade gravimétrica ($kg.kg^{-1}$); M_{su} = peso da amostra úmida (kg); M_{ss} = peso da amostra seca (kg).

4.2.3.4. Resistência do solo à penetração

Para a determinação da resistência do solo à penetração (RP), foi utilizado um penetrógrafo eletrônico digital, marca *Eijkelkamp* e modelo 06.15.SA, equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm^2 (11,28 mm de diâmetro nominal), com a velocidade de penetração controlada automaticamente em 2 cm.s^{-1} (Figura 7). O procedimento amostral foi feito conforme recomendação da ASAE S 313, citado por Balastreire (1987), sendo as leituras realizadas a cada 1 cm até a profundidade de 80 cm, fazendo duas leituras para cada ponto amostral, usando o valor médio entre duas leituras.



Figura 7. Penetrógrafo eletrônico digital, marca *Eijkelkamp*.

4.2.4. Análises estatísticas

4.2.4.1. Análise de variância e comparação de médias

O delineamento estatístico utilizado foi o de experimento inteiramente casualizado. Para as variáveis de densidade do solo (Ds) e a porosidade total (Pt), as análises foram realizadas para as profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, enquanto para a resistência à penetração (RP), embora as medições tenham sido feitas em intervalos de 1 cm, as análises foram realizadas a cada 10 cm até a profundidade de 80 cm.

Os valores de todas as variáveis foram avaliados pela diferença entre a situação sem tráfego (ST) e após tráfego (AT), pareados por local de amostragem dentro da parcela, sendo primeiramente submetidos ao teste de *Bartlett*, para verificação da homogeneidade das variâncias. Verificada a homogeneidade de variâncias, foi realizada em seguida a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de *Tukey* a 5 % de significância.

4.2.4.2. Relações e desenvolvimento de equações para estimativa da resistência à penetração

Para verificar a relação entre a resistência à penetração (RP) e as outras variáveis, e para o desenvolvimento de equações de estimativa dessa variável, primeiramente se realizou uma análise exploratória dos dados para detectar a presença de dados discrepantes (*outliers*).

Foi considerando como dado discrepante, qualquer dado peculiar que indicasse uma observação cujo valor fosse muito superior ou inferior ao restante das observações. Para a eliminação dos dados discrepantes foram considerados os seguintes critérios (TUKEY, 1977; HOAGLIN, 1983; REGAZZI e LEITE, 1993):

1. eliminar quando for possível afirmar que houve em erro de medição ou determinação;
2. eliminar quando um dado for maior que o restante, em valor absoluto, pelo menos duas vezes o desvio padrão residual;
3. eliminar dados abaixo do limite inferior (LI) ou acima do limite superior (LS) pelas seguintes expressões:

$$LS = QS + 1,5 AI$$

e

$$LI = QI - 1,5 AI$$

onde:

LS = limite superior; LI = limite inferior; QS = quartil inferior; QI = quartil inferior; AI: amplitude interquartílica.

Após a eliminação dos dados discrepantes, foi verificada a relação entre a resistência à penetração e as outras variáveis avaliadas (Ds, Pt e Ug) por regressão linear.

Em seguida procedeu-se com o desenvolvimento e ajuste de equações de regressão múltipla para a estimativa da resistência do solo à penetração (RP), usando como variáveis independentes a densidade do solo (Ds) e a umidade gravimétrica do solo (Ug). Foram comparados modelos aritméticos com variáveis puras e variáveis mistas, modelos logarítmicos com variáveis mistas, e o modelo proposto por Busscher (1990) linearizado e adaptado. Para a avaliação estatística das equações, foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) (DRAPER e SMITH, 1981), o erro padrão da estimativa absoluto e em percentagem (Syx e Syx %), o valor de F, e a análise gráfica dos resíduos em percentagem, sendo que ao final, a equação que teve melhor ajuste foi aplicada para ilustrar a variação da resistência à penetração em função da umidade e da densidade.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Densidade do solo

As Figuras 8 e 9 mostram o comportamento da densidade do solo nas situações sem tráfego e após tráfego em cada classe de umidade gravimétrica nos dois solos estudados. Em ambos os solos, é possível observar que houve uma ligeira redução na densidade com o aumento da umidade, sendo este comportamento semelhante em todas as profundidades. Isto pode ser devido aos altos conteúdos de matéria orgânica presente nesses solos, sendo que, com o aumento da umidade, a matéria orgânica constituinte do solo retém a água, diminuindo consequentemente a densidade do mesmo.

Pode-se ver de forma semelhante nos dois solos, que o incremento na densidade, causado pelo tráfego das máquinas de colheita, foi maior conforme aumentou a umidade. No Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa), nota-se que em condição mais seca (Ug1), quase não houve efeito do tráfego sobre a densidade, somente havendo incremento do atributo na maior profundidade avaliada (30 a 50 cm).

No Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh) é possível se ver que foi na camada de solo mais superficial (0 a 15 cm) que ocorreram as maiores diferenças entre a situação sem tráfego (ST) e pós-colheita da madeira (AT) para todas as classes de umidade gravimétrica. Estudando a compactação causada por máquinas florestais, Froehlich *et al.* (1980) também constataram tal ocorrência, relatando ainda, que os efeitos nocivos do tráfego sobre o solo tendem decrescer com a profundidade.

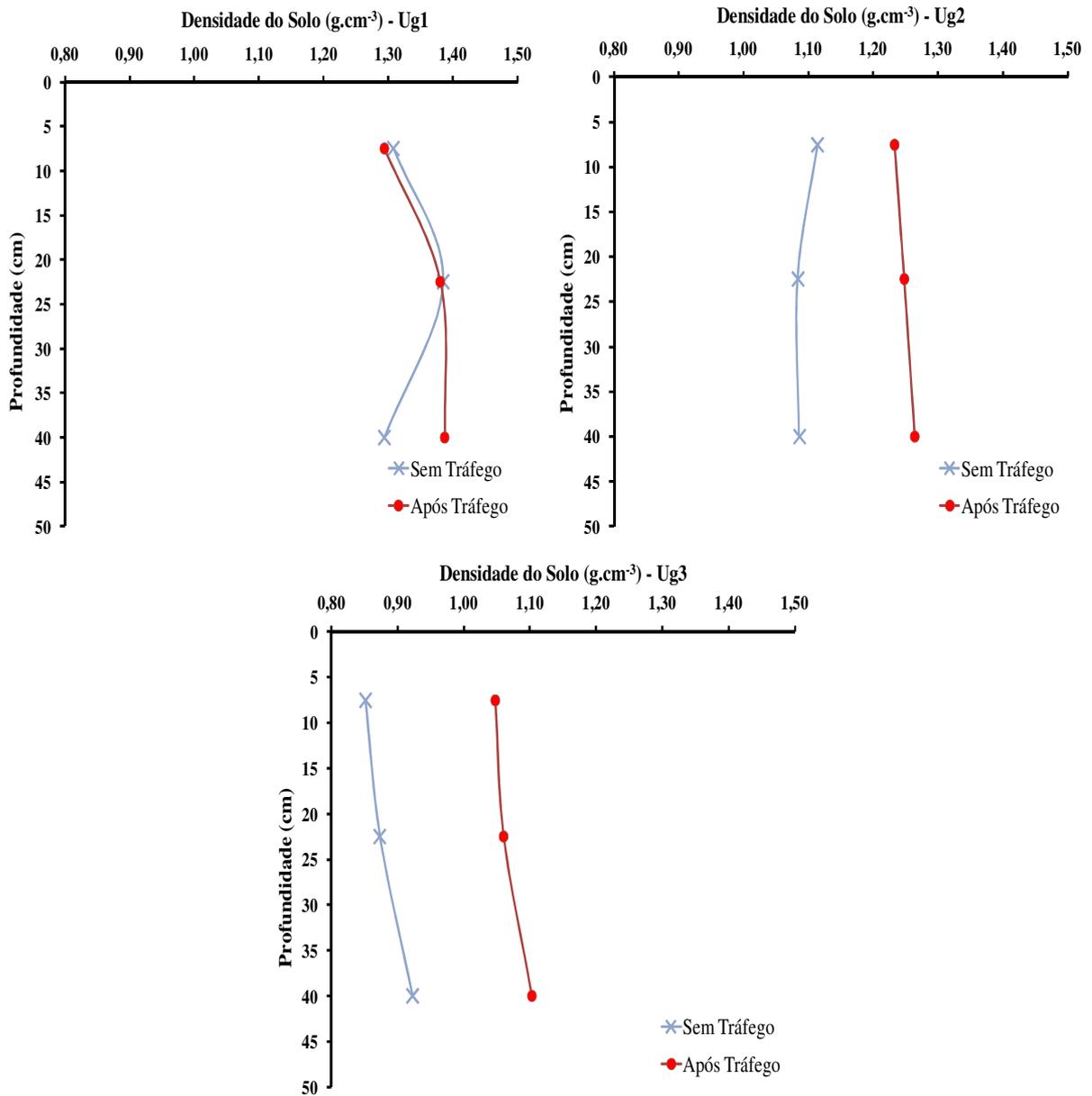


Figura 8. Valores médios de densidade do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

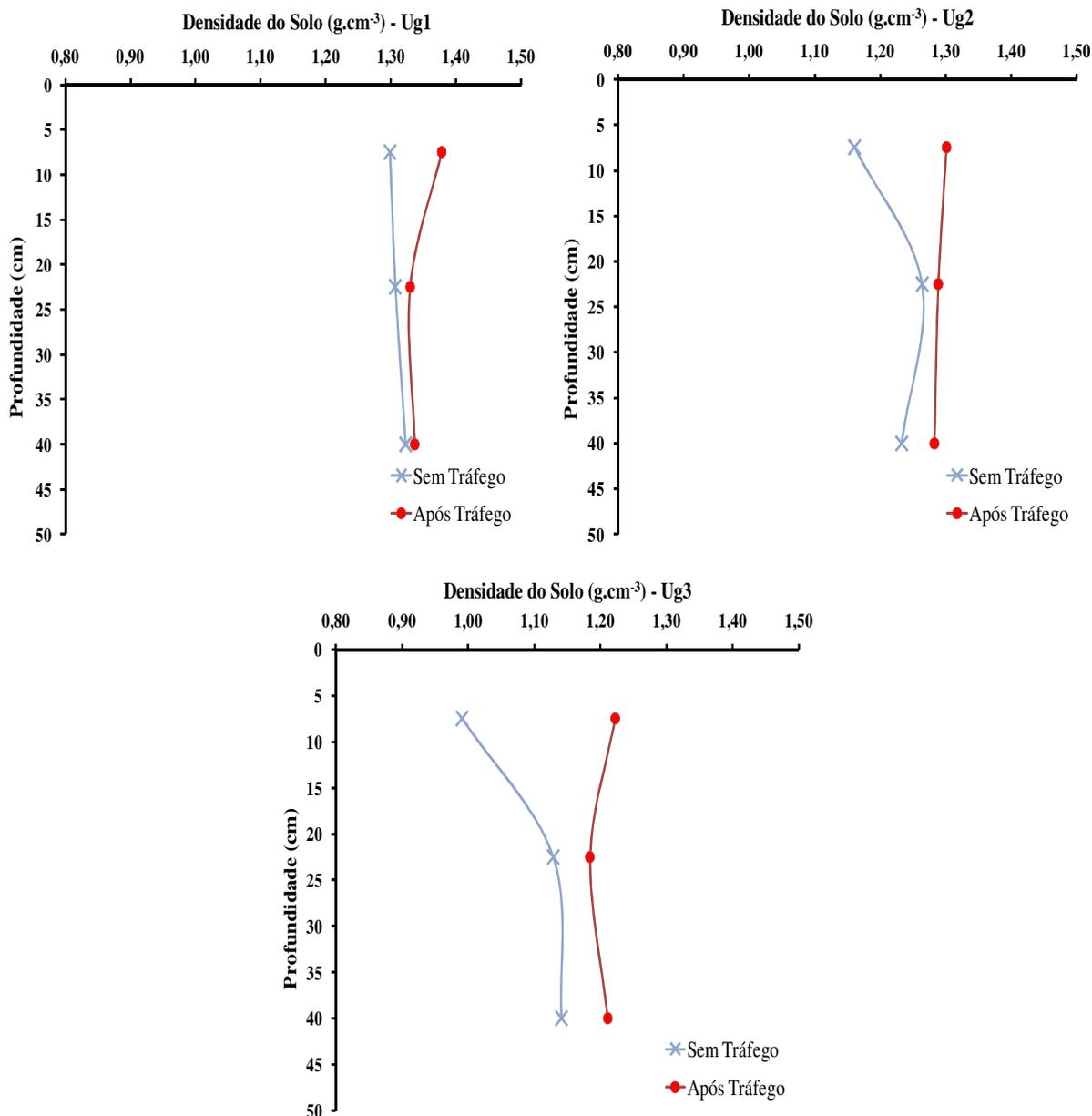


Figura 9. Valores médios de densidade do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Conforme pode ser visto na Tabela 5, no CHa as maiores diferenças em densidade entre a situação sem tráfego (ST) e após tráfego das máquinas (AT) em todas as profundidades ocorreram na condição Ug3. Na profundidade de 0 a 15 cm, na classe Ug3, o tráfego das máquinas ocasionou incremento na densidade de 18,72 %, havendo diferença significativa em relação às condições de solo mais secas (Ug1 e Ug2), observando que também houve diferença entre Ug2 e Ug1. Percebe-se que nessa profundidade, este solo apresentou sensibilidade em função da variação de umidade, mostrando haver efeito gradual

do tráfego sobre a densidade conforme se aumentou o conteúdo de água do solo. No intervalo de profundidade entre 15 a 50 cm, não houve diferença significativa entre as classes de maior umidade (Ug2 e Ug3), apesar de que na classe Ug3 foram verificados os maiores incrementos gerados pelo tráfego sobre a densidade, sendo estes incrementos na ordem de 17,63 e 16,35 %, para 15 a 30 cm, e 30 a 50 cm de profundidade, respectivamente. Assim, se pode inferir que as camadas de maior profundidade deste solo, são mais sensíveis ao aumento da condição de umidade.

Em relação ao RRh (Tabela 6), se verifica que a maior diferença em densidade do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira (AT) em relação ao local sem tráfego (ST) para a profundidade de 0 a 15 cm foi encontrada na classe de umidade gravimétrica acima de $0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug3), com 18,93 % de incremento. O efeito do tráfego sobre a densidade nesta condição de umidade (Ug3) não foi diferente significativamente quando comparado à condição Ug2, que por sua vez não se diferenciou da condição Ug1. Da mesma maneira isto ocorreu para a profundidade de 30 a 50 cm, sendo possível notar que a condição de maior umidade (Ug3) possibilitou o maior aumento em densidade ocasionado pelo tráfego das máquinas, com incremento de 4,70 %. Já na profundidade intermediária de solo avaliada (15 a 30 cm), o efeito do tráfego sobre a densidade foi menor em comparação com as outras profundidades, contudo, a maior diferença em densidade ocorreu da mesma forma que nas outras profundidades, na classe Ug3 havendo 3,87 % de incremento na densidade.

Ainda comparando os aumentos de densidade neste solo (RRh) entre as profundidades, percebe-se que o incremento nas camadas mais profundas (15 a 30 e 30 a 50 cm) foi em média 73,4 % menor do que na camada superficial (0 a 15 cm). Esse resultado mostra, mais uma vez, que essa camada apresentou maior susceptibilidade às alterações promovidas pelo tráfego das máquinas, mesmo em diferentes condições de umidade do solo.

Observa-se nos dois solos que em nenhuma das classes de umidade ou profundidades avaliadas, a densidade após tráfego (AT) chega a ser maior do que a densidade crítica (D_{sc} IHO), estando os valores bem abaixo desse limite. Porém, se não for levado em consideração este critério, percebe-se que o tráfego das máquinas de colheita da madeira causou efeitos significativos nestes solos.

Tabela 5. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica (kg.kg ⁻¹)										Ds _c IHO	Ds _c Rest
		Ug1 (Ug < 0,30)			Ug2 (0,30 ≤ Ug < 0,40)			Ug3 (Ug ≥ 0,40)					
		Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs	Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs	Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs			
		g.cm ⁻³			g.cm ⁻³			g.cm ⁻³			g.cm ⁻³		
0 — 15	28,07**	1,29 (±0,08)	1,31 (±0,07)	-0,01 c	1,23 (±0,09)	1,11 (±0,05)	0,12 b	1,05 (±0,14)	0,85 (±0,12)	0,20 a	1,63	1,71	
15 — 30	8,96**	1,38 (±0,11)	1,38 (±0,08)	0,02 b	1,25 (±0,09)	1,08 (±0,15)	0,16 a	1,06 (±0,11)	0,87 (±0,10)	0,19 a	1,64	1,71	
30 — 50	7,23**	1,39 (±0,10)	1,30 (±0,11)	0,09 b	1,26 (±0,10)	1,09 (±0,08)	0,18 a	1,10 (±0,13)	0,92 (±0,13)	0,18 a	1,58	1,65	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ: diferença considerando condição após e sem tráfego; Ds_c IHO: densidade do solo crítica e Ds_c Rest: densidade do solo restritiva de acordo com equações propostas por Reinert *et al.* (2006).

Tabela 6. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica (kg.kg^{-1})										D_{sc} IHO	D_{sc} Rest
		Ug1 ($Ug < 0,30$)			Ug2 ($0,30 \leq Ug < 0,40$)			Ug3 ($Ug \geq 0,40$)					
		Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs	Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs	Ds (AT)	Ds (ST)	ΔDs			
		g.cm^{-3}			g.cm^{-3}			g.cm^{-3}			g.cm^{-3}		
0 — 15	4,87*	1,38 ($\pm 0,09$)	1,30 ($\pm 0,07$)	0,08 b	1,30 ($\pm 0,04$)	1,16 ($\pm 0,08$)	0,14 ab	1,22 ($\pm 0,07$)	0,99 ($\pm 0,24$)	0,23 a	1,68	1,75	
15 — 30	8,80**	1,33 ($\pm 0,11$)	1,31 ($\pm 0,11$)	0,02 b	1,29 ($\pm 0,05$)	1,26 ($\pm 0,05$)	0,03 b	1,19 ($\pm 0,05$)	1,13 ($\pm 0,05$)	0,06 a	1,66	1,73	
30 — 50	3,20*	1,34 ($\pm 0,07$)	1,33 ($\pm 0,04$)	0,01 b	1,28 ($\pm 0,06$)	1,23 ($\pm 0,05$)	0,01 ab	1,21 ($\pm 0,04$)	1,14 ($\pm 0,05$)	0,07 a	1,55	1,63	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ : diferença considerando condição após e sem tráfego; D_{sc} IHO: densidade do solo crítica e D_{sc} Rest: densidade do solo restritiva de acordo com equações propostas por Reinert *et al.* (2006).

Pela Figura 10 é possível ver as diferenças médias percentuais da densidade após o tráfego das máquinas em relação à situação sem tráfego nas classes de umidade e profundidades nos dois solos estudados. No CHa em todas as profundidades na classe de maior umidade gravimétrica (Ug3) houve incrementos acima de 15 % na densidade do solo, que de acordo com Geist *et al.* (1989) pode restringir o crescimento radicular das plantas. Já no RRh isto é verificado na condição de maior umidade na camada mais superficial, onde se constatou que tal nível de compactação foi atingindo.

No CHa pode-se observar que nas condições mais secas ocorreram as maiores diferenças de densidade nas camadas mais profundas do solo, sendo que com o aumento da umidade, houve maior diferença detectada na camada mais superficial do solo, enquanto no RRh a compactação foi maior na superfície do solo, diminuindo nas camadas mais profundas, ocorrendo em maior intensidade no nível mais elevado de umidade.

De forma geral, os resultados obtidos de densidade mostraram uma clara diferença entre os solos avaliados. O CHa se mostrou mais susceptível ao aumento da umidade, tendo ocorrido grandes alterações na densidade decorrentes do tráfego das máquinas em todas as profundidades com o aumento da umidade. Já o RRh teve maior resistência ao tráfego mesmo com o aumento da umidade, contudo, apresentou maior susceptibilidade na camada superficial.

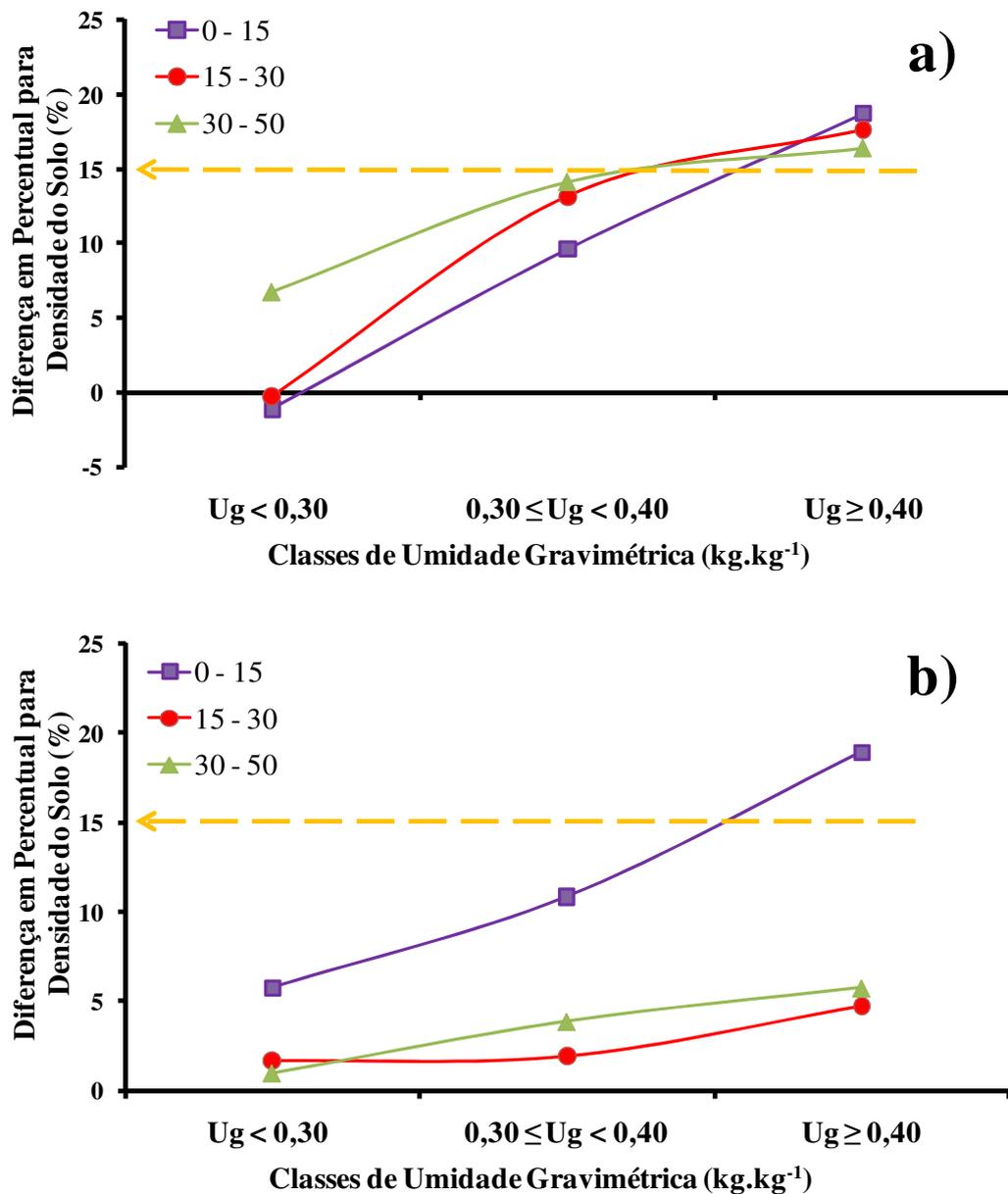


Figura 10. Diferenças médias percentuais da densidade do solo considerando após tráfego e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b); Seta laranja indica limite crítico restritivo ao crescimento radicular de acordo com Geist *et al.* (1989).

4.3.2. Porosidade total do solo

O comportamento dos dois solos em relação à porosidade total é apresentado nas Figuras 11 e 12.

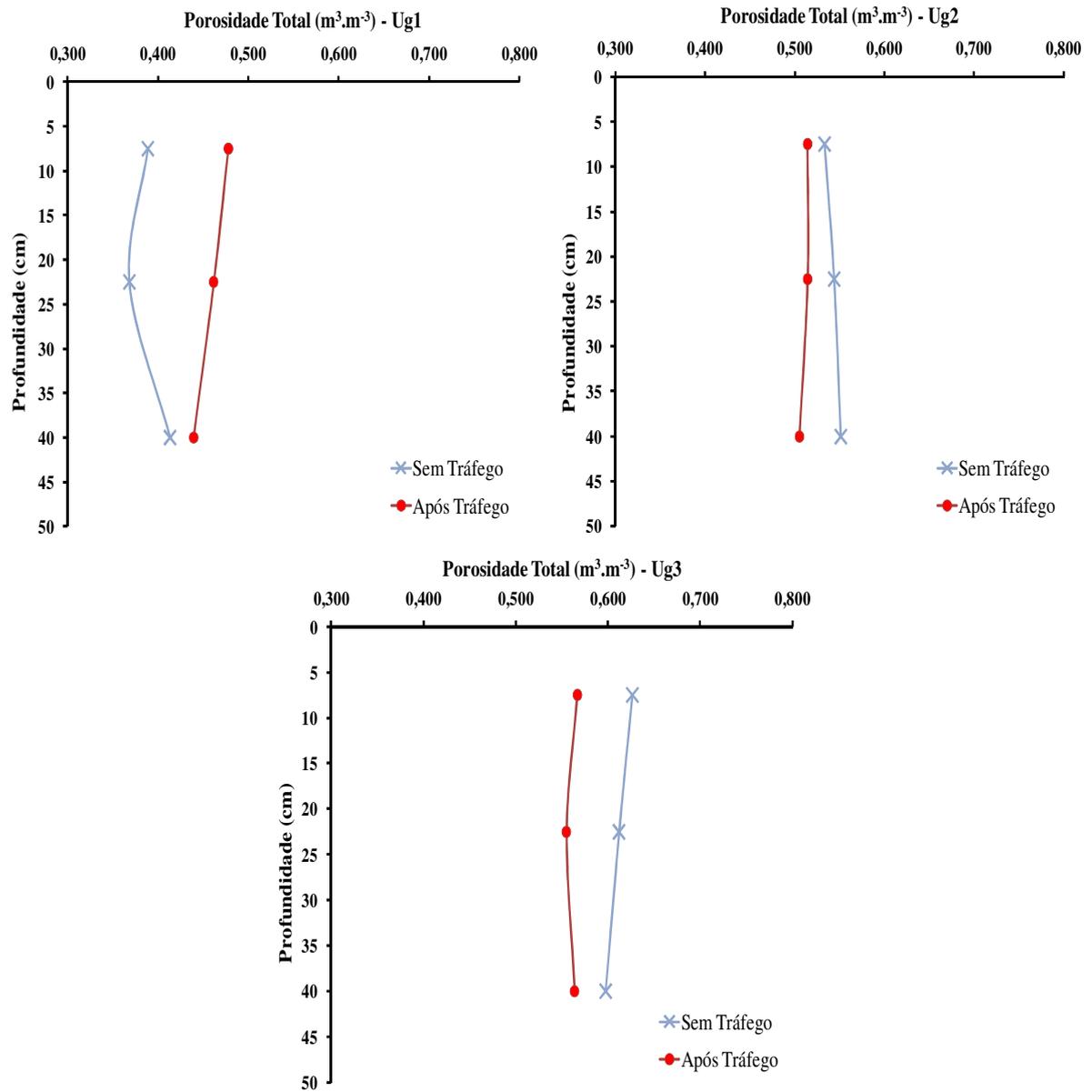


Figura 11. Valores médios de porosidade total do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

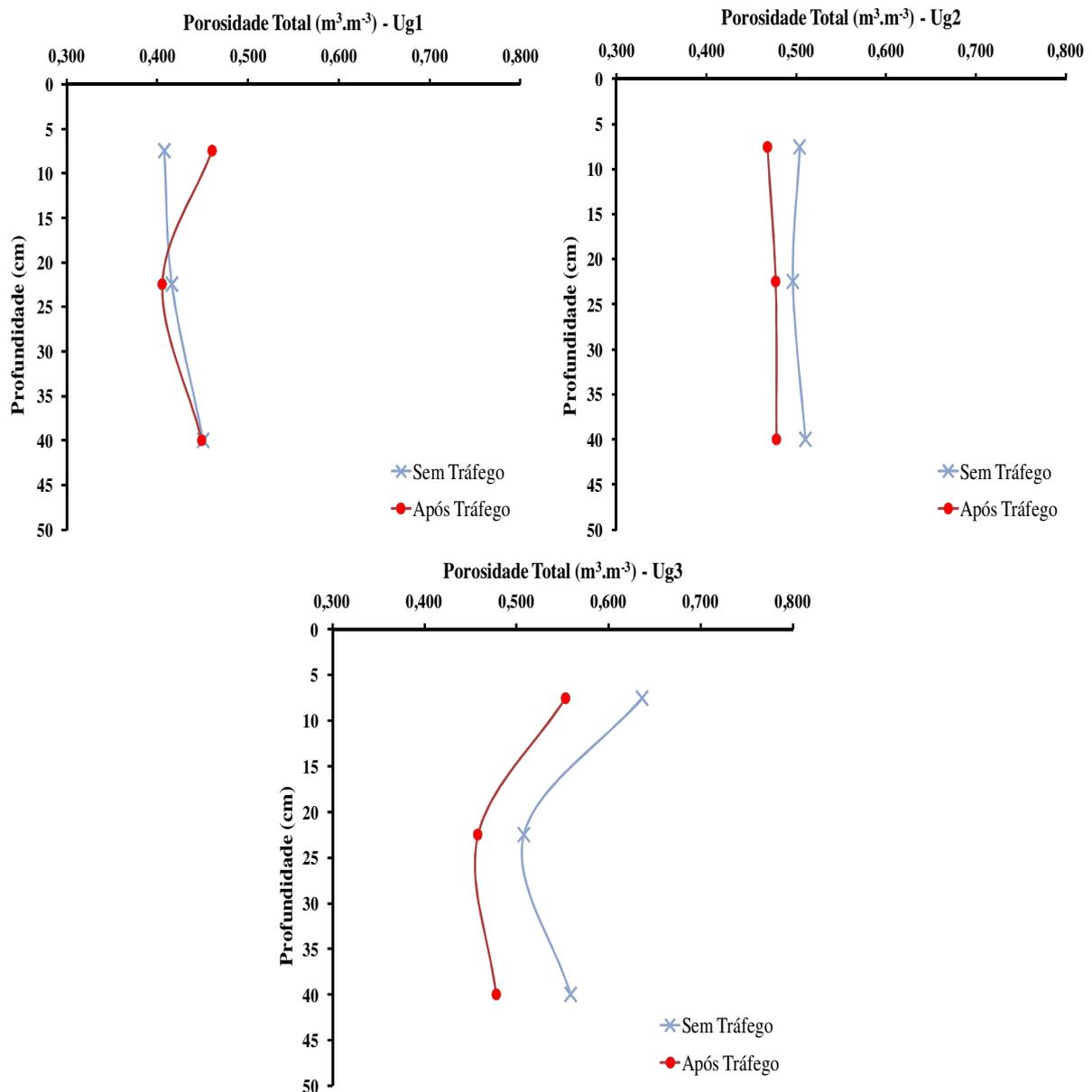


Figura 12. Valores médios de porosidade total do solo sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Como pode ser visto pelas figuras, com o aumento da umidade, houve um aumento da porosidade do solo em todas as profundidades. Isto pode ser explicado, de acordo com Eavis (1972), devido à umidade ter grande influência na redução e redistribuição do espaço poroso, assim influenciando na maior ou menor porosidade do solo.

A porosidade total nos dois solos apresentou variações de resposta ao impacto das máquinas florestais. Observa-se que na classe Ug1, em ambos os solos, a porosidade total aparentemente aumentou após o tráfego das máquinas. Esse aumento da porosidade após

tráfego pode ter sido devido à compressão do espaço poroso imposta pela compactação, causando também a desestruturação e o rearranjo das partículas do solo (SMITH *et al.*, 1997). Também se pode atribuir isso, ao efeito da compactação em aumentar a microporosidade do solo, às custas da macroporosidade, e assim, conseqüentemente, ocasionando um aumento na porosidade total. E ainda, este comportamento pode ser associado, devido às diferenças na densidade de partículas determinada em cada amostra, havendo diferenças em consequência, no cálculo da porosidade.

No CHa, é possível notar que as maiores reduções da porosidade total ocorreram na classe de umidade gravimétrica acima de $0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug3) (Tabela 7), com reduções de 9,44, 9,35 e 5,68 %, nas camadas de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm de profundidade, respectivamente. Pelas diferenças estatísticas detectadas, percebe-se que a profundidade de solo de 0 a 15 cm, foi mais sensível à variação da umidade, havendo diferenças significativas entre todas as classes de umidade. Nas outras profundidades (15 a 30 e 30 a 50 cm), verificou-se que um ligeiro aumento da umidade (de Ug1 para Ug2), já trouxe diferenças significativas de porosidade.

Em relação aos resultados de porosidade total no RRh (Tabela 8) verificou-se também, que a camada de 0 a 15 cm se mostrou mais sensível às alterações dessa propriedade, apresentando resultados distintos de acordo com as classes de umidade gravimétrica. Da mesma forma, a maior redução da porosidade nesta profundidade aconteceu na maior classe de umidade (Ug3), com 13,09 %, seguido pela condição intermediária de umidade (Ug2), com 7,22 %, e por último pela condição mais seca (Ug1), com acréscimo de 12,79 %. Na profundidade de 15 a 30 cm, a condição de umidade gravimétrica acima de $0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug3), novamente teve a maior redução de porosidade total com 9,78 %, contudo, não apresentou diferença significativa em relação à classe Ug2 (redução de 5,8 %), sendo que esta última classe, não se diferenciou da classe Ug1 (redução de 2,60 %). A redução mais acentuada da porosidade na profundidade de 30 a 50 cm ocorreu na condição Ug3 (14,47 %), sendo que esta condição diferiu estatisticamente em relação às outras condições de umidade (Ug1 e Ug3), evidenciando novamente o efeito da umidade sobre as propriedades físicas do solo.

Em condição de menor umidade no CHa, as maiores diferenças em porosidade total, acarretadas pelas operações de colheita da madeira, ocorreram nas maiores profundidades de solo, enquanto que em condição mais úmida, as diferenças foram mais acentuadas nas

menores profundidades do perfil de solo (Figura 13a). No RRh, as maiores diferenças de porosidade incidiram nas condições de maior conteúdo de água no solo, sendo este comportamento semelhante para todas as camadas do perfil de solo (Figura 13b). Em média, nos dois solos, foi com o aumento da umidade que se constataram as maiores reduções em porosidade.

É possível perceber ainda, que a porosidade, tanto no CHa, como no RRh, se comportou semelhante à densidade do solo. Esses resultados deixam em evidência a elevada relação dessas duas propriedades, conforme constatado por Seixas *et al.* (1998). Assim, pode-se dizer que qualquer agente que possa alterar a porosidade do solo, tenderá a afetar a densidade também.

De maneira geral nos dois solos, foi com a ocorrência de maior umidade que foram constatadas as maiores alterações em relação à densidade e porosidade total, sendo que a magnitude dessas alterações foi diferente em cada solo avaliado, como já esperado. Esta diferença entre os solos pode ser devido à susceptibilidade à compactação ser fortemente dependente da quantidade de matéria orgânica e da textura do solo (LARSON e ALLMARAS, 1971; CLAYTON *et al.*, 1987). Os dois solos estudados apresentaram diferentes teores de areia e carbono orgânico em seus perfis, sendo que estas diferenças podem ter influenciado na resistência às alterações provocadas pelo tráfego das máquinas de cada solo.

De forma geral, ressalta-se que os efeitos do aumento da umidade nestes solos, foram bem visíveis. Tais resultados são importantes e mostram a necessidade de adoção de medidas de precaução sobre o momento das operações de colheita da madeira, principalmente quando os solos estiverem com elevada umidade, podendo assim haver possibilidades para minimização dos impactos ambientais e das possíveis perdas de produtividade nas rotações florestais futuras.

Tabela 7. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
		Ug1 ($\text{Ug} < 0,30$)			Ug2 ($0,30 \leq \text{Ug} < 0,40$)			Ug3 ($\text{Ug} \geq 0,40$)		
		Pt (ST)	Pt (AT)	Δ Pt	Pt (ST)	Pt (AT)	Δ Pt	Pt (ST)	Pt (AT)	Δ Pt
		$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$		
0 — 15	36,75**	0,389 ($\pm 0,072$)	0,478 ($\pm 0,029$)	-0,089 c	0,533 ($\pm 0,031$)	0,514 ($\pm 0,036$)	0,019 b	0,626 ($\pm 0,058$)	0,567 ($\pm 0,051$)	0,060 a
15 — 30	19,48**	0,369 ($\pm 0,092$)	0,462 ($\pm 0,045$)	-0,093 b	0,544 ($\pm 0,068$)	0,514 ($\pm 0,037$)	0,030 a	0,612 ($\pm 0,043$)	0,555 ($\pm 0,043$)	0,057 a
30 — 50	7,84**	0,414 ($\pm 0,067$)	0,439 ($\pm 0,054$)	-0,026 b	0,552 ($\pm 0,036$)	0,505 ($\pm 0,046$)	0,047 a	0,598 ($\pm 0,043$)	0,564 ($\pm 0,036$)	0,034 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ : diferença considerando condição sem e após tráfego.

Tabela 8. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
		Ug1 ($\text{Ug} < 0,30$)			Ug2 ($0,30 \leq \text{Ug} < 0,40$)			Ug3 ($\text{Ug} \geq 0,40$)		
		Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt	Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt	Pt (ST)	Pt (AT)	ΔPt
		$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$		
0 — 15	9,88**	0,408 ($\pm 0,040$)	0,460 ($\pm 0,035$)	-0,052 b	0,504 ($\pm 0,089$)	0,468 ($\pm 0,034$)	0,036 a	0,636 ($\pm 0,074$)	0,553 ($\pm 0,044$)	0,083 a
15 — 30	4,34*	0,416 ($\pm 0,051$)	0,405 ($\pm 0,045$)	0,011 b	0,496 ($\pm 0,042$)	0,477 ($\pm 0,044$)	0,019 ab	0,508 ($\pm 0,054$)	0,458 ($\pm 0,046$)	0,050 a
30 — 50	16,19**	0,450 ($\pm 0,005$)	0,448 ($\pm 0,016$)	0,002 b	0,510 ($\pm 0,032$)	0,478 ($\pm 0,038$)	0,032 b	0,558 ($\pm 0,026$)	0,477 ($\pm 0,041$)	0,081 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ : diferença considerando condição sem e após tráfego.

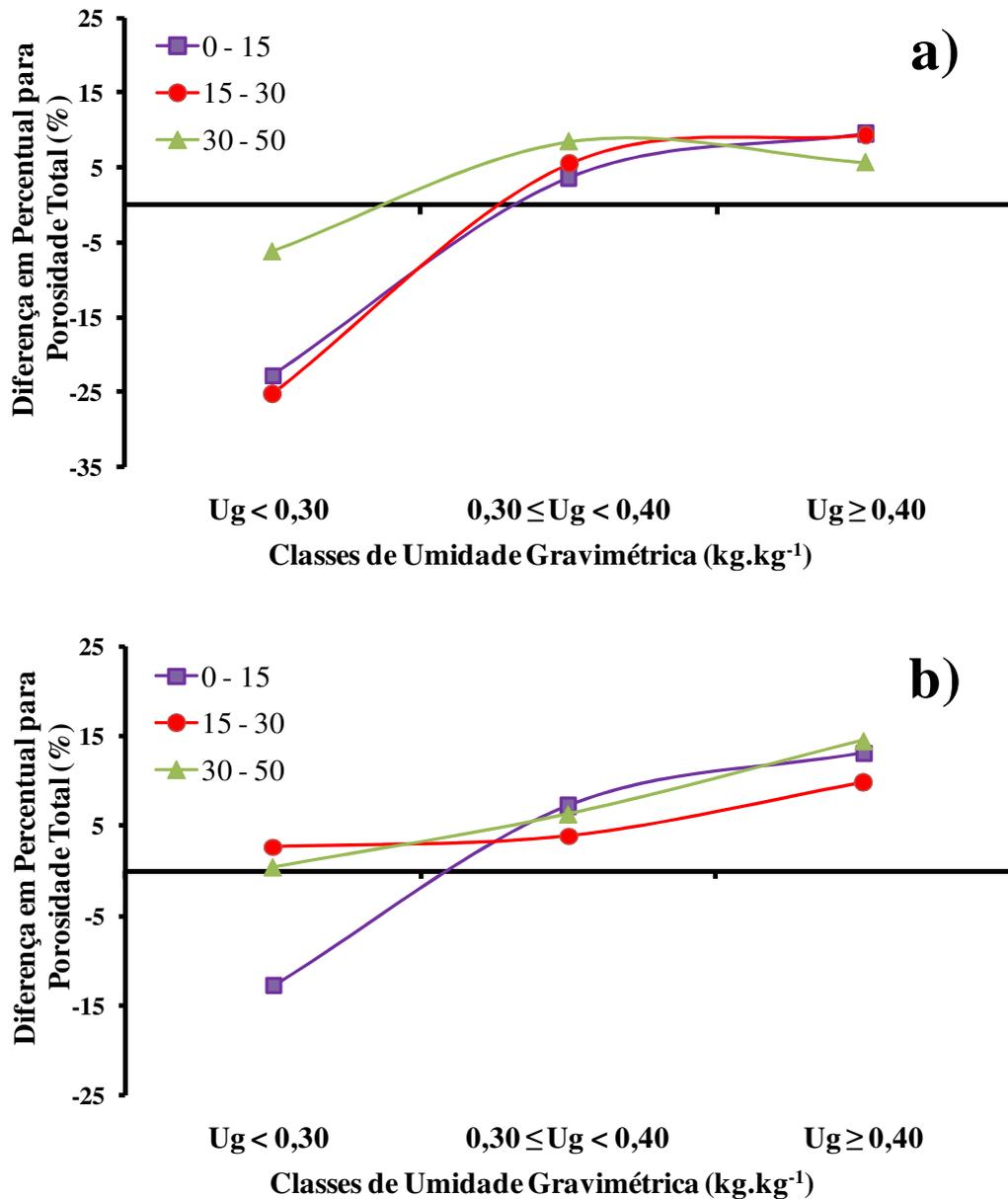


Figura 13. Diferenças médias percentuais da porosidade total do solo considerando após e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b).

4.3.3. Resistência do solo à penetração

As Figuras 14 e 15 mostram os valores médios de resistência do solo à penetração nas condições sem tráfego e após tráfego das máquinas nos dois solos estudados. Como pode ser visto, a resistência do solo à penetração apresentou um comportamento decrescente com o aumento da umidade dos solos. De acordo com Beltrame *et al.* (1981), para uma variação da

umidade do solo, ocorre variação no sentido contrário na resistência do solo à penetração, pois o teor de água intervém nesse processo, modificando a coesão entre as partículas do solo. Porém, é possível ver que no RRh, o aumento da umidade gravimétrica não influenciou tão fortemente a variação desta propriedade, como se pode ver no CHa, indicando que o teor de água no primeiro solo (CHa) afetou mais o comportamento da resistência à penetração do que no segundo (RRh).

Em todas as condições estudadas em ambos os solos, foi possível notar que o tráfego das máquinas de colheita da madeira causou alterações na resistência à penetração até as maiores profundidade de solo, da mesma maneira como relatado por Ampoorter *et al.* (2007), que detectaram alterações na resistência à penetração causadas pelo tráfego de máquinas florestais, até a profundidade de 80 cm em solos arenosos. Warkotsch *et al.* (1994) também observaram isso ao trabalhar com solos de textura arenosa, constatando efeitos da compactação em profundidades de até 60 a 80 cm, causados pelo tráfego de máquinas de extração florestal.

Para Reichert *et al.* (2007), a profundidade de compactação varia conforme as especificações da máquinas e seu rodado, condições do solo, número de passadas, histórico de pressões, e o tipo de manejo aplicado ao solo, sendo que em áreas florestais em decorrência do maior peso e intensidade de tráfego das máquinas, a compactação atinge profundidades mais elevadas.

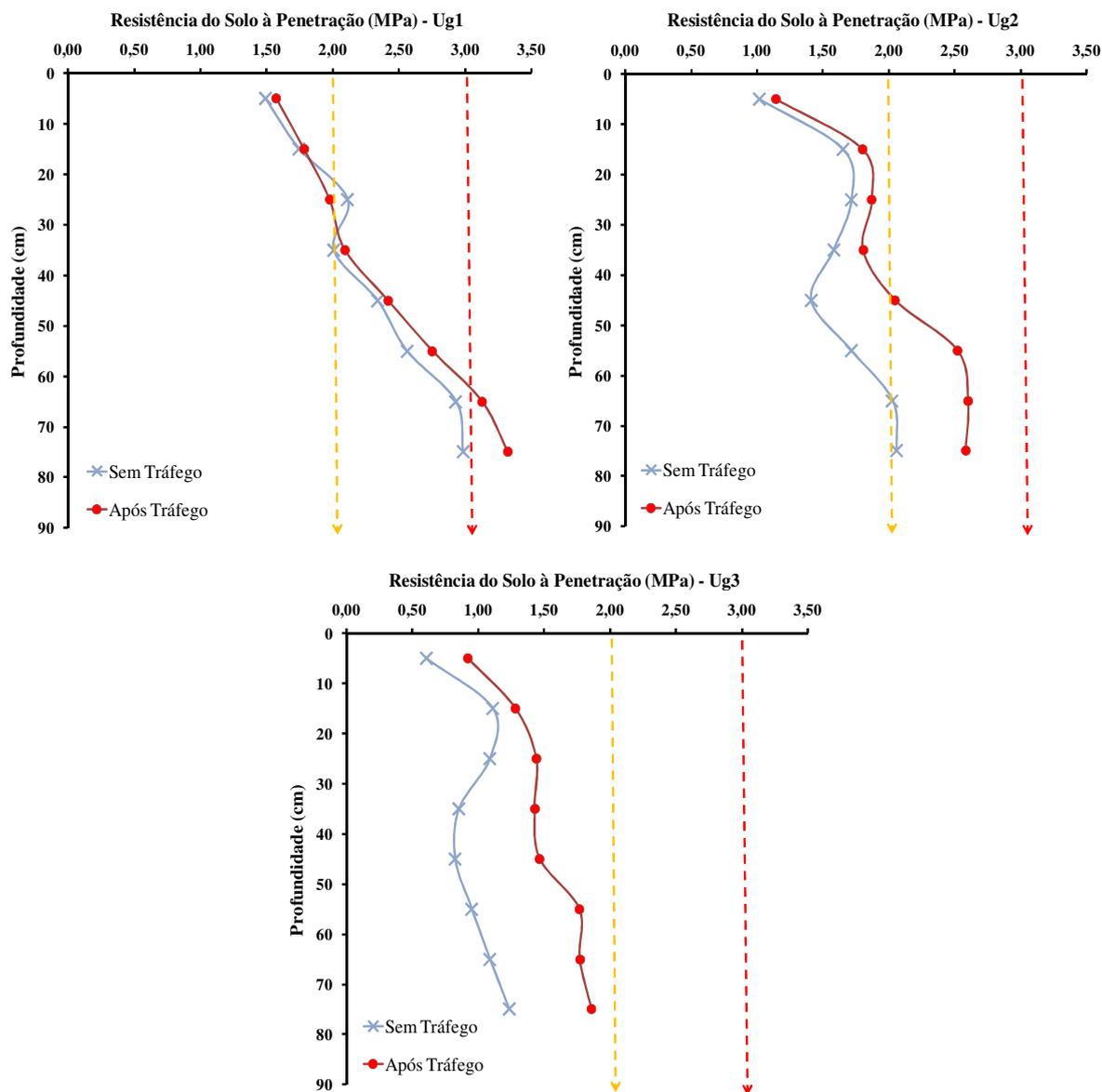


Figura 14. Valores médios de resistência do solo à penetração sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa); Seta laranja indica valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a); Seta vermelha indica valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU *et al.*; 2000).

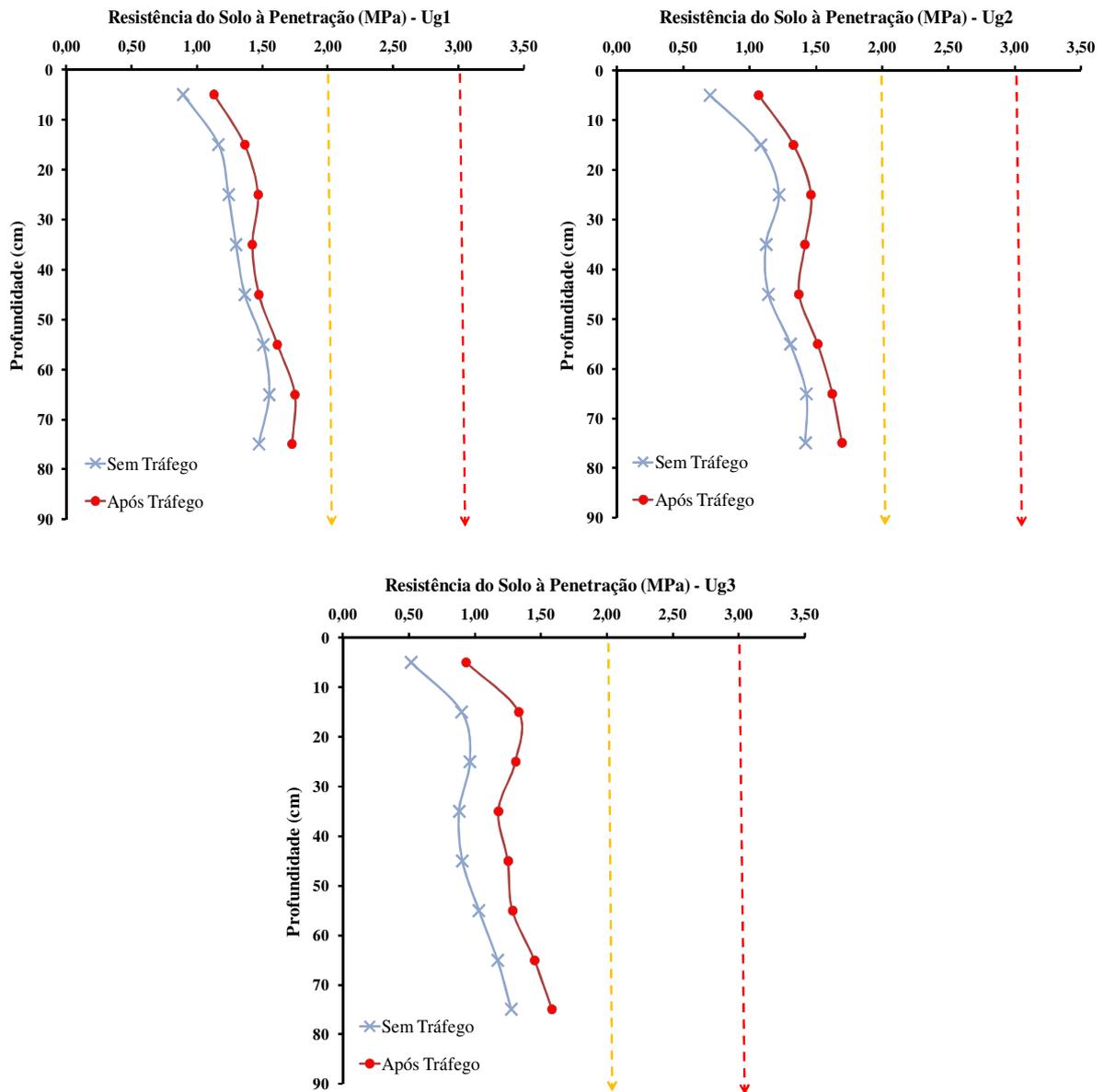


Figura 15. Valores médios de resistência do solo à penetração sem e após tráfego para as classes de umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh); Seta laranja indica valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a); Seta vermelha indica valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (Zou *et al.*; 2000).

Os resultados de resistência à penetração, em ambos os solos, mostram que, na classe de umidade acima de $0,40 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug3), ocorreram as maiores diferenças em todas as profundidade avaliadas (Tabela 9 e 10). No entanto, se observadas as diferenças ao longo do perfil de cada solo, se percebe que cada solo respondeu diferentemente às condições impostas.

Porém, nota-se que em nenhum intervalo de profundidade dos solos, foram observadas as maiores diferenças na classe de umidade abaixo de $0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug1), reforçando o conceito sobre os efeitos da umidade no momento da compactação.

No CHa, na classe de umidade gravimétrica abaixo de $0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$ (Ug1), verificaram-se valores acima de 2 MPa já nas primeiras camadas de profundidade do solo, observando também na classe Ug2 em maiores profundidades, sendo que a partir desse limite que o crescimento radicular começa a se tornar restritivo (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a). Entretanto, esse valor aumentou, chegando a exceder 3 MPa nas últimas camadas da classe Ug1. Para Zou *et al.* (2000) esse valor é o limite para o desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais (RP restritiva). Por isso, o desenvolvimento de plantas pode estar prejudicado, considerando os valores atingidos.

Já no RRh, em nenhuma classe de umidade gravimétrica, se observaram valores de resistência à penetração considerados críticos ou restritivos (acima de 2 ou 3 MPa, respectivamente), nas camadas de solo avaliadas.

Enfatiza-se que, nos dois solos, houve um aumento do desvio padrão dos valores em todas as classes de umidade, conforme aumentou a profundidade do solo, podendo isto ser um indicativo de que a variabilidade do solo aumenta quanto mais profunda for a camada de solo avaliada.

Tabela 9. Valores médios de resistência do solo à penetração (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica (kg.kg ⁻¹)								
		Ug1			Ug2			Ug3		
		RP (AT)	RP (ST)	Δ RP	RP (AT)	RP (ST)	Δ RP	RP (AT)	RP (ST)	Δ RP
		MPa			MPa			MPa		
0 — 10	7,06**	1,57 (\pm 0,50)	1,49 (\pm 0,48)	0,08 b	1,14 (\pm 0,38)	1,02 (\pm 0,40)	0,13 b	0,92 (\pm 0,35)	0,60 (\pm 0,40)	0,32 a
10 — 20	5,75**	1,78 (\pm 0,52)	1,74 (\pm 0,51)	0,04 b	1,80 (\pm 0,62)	1,65 (\pm 0,66)	0,15 a	1,28 (\pm 0,66)	1,11 (\pm 0,72)	0,17 a
20 — 30	22,33**	1,98 (\pm 0,63)	2,11 (\pm 0,49)	-0,14 c	1,87 (\pm 0,74)	1,71 (\pm 0,78)	0,16 b	1,44 (\pm 0,48)	1,09 (\pm 0,62)	0,35 a
30 — 40	5,79**	2,09 (\pm 0,69)	2,00 (\pm 0,53)	0,09 b	1,80 (\pm 0,72)	1,58 (\pm 0,53)	0,22 ab	1,43 (\pm 0,41)	0,85 (\pm 0,38)	0,57 a
40 — 50	11,61**	2,42 (\pm 0,88)	2,34 (\pm 0,85)	0,08 b	2,05 (\pm 0,85)	1,41 (\pm 0,48)	0,64 a	1,47 (\pm 0,40)	0,82 (\pm 0,32)	0,64 a
50 — 60	7,22**	2,75 (\pm 0,93)	2,56 (\pm 0,87)	0,19 b	2,52 (\pm 1,08)	1,71 (\pm 0,31)	0,81 a	1,77 (\pm 0,63)	0,95 (\pm 0,41)	0,82 a
60 — 70	5,66**	3,13 (\pm 1,18)	2,93 (\pm 1,19)	0,20 b	2,60 (\pm 0,60)	2,03 (\pm 0,30)	0,58 a	1,77 (\pm 0,61)	1,09 (\pm 0,50)	0,68 a
70 — 80	1,89 ns	3,32 (\pm 1,23)	2,98 (\pm 1,10)	0,34	2,58 (\pm 0,39)	2,06 (\pm 0,31)	0,53	1,86 (\pm 0,68)	1,24 (\pm 0,54)	0,62

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ : diferença considerando condição após e sem tráfego.

Tabela 10. Valores médios de resistência do solo à penetração (\pm desvio padrão) nas diferentes classes de umidade gravimétrica e profundidades no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Profundidades (cm)	Valor F	Classes de Umidade Gravimétrica (kg.kg ⁻¹)								
		Ug1			Ug2			Ug3		
		RP (AT)	RP (ST)	Δ RP	RP (AT)	RP (ST)	Δ RP	RP (AT)	RP (ST)	Δ RP
		MPa			MPa			MPa		
0 — 10	24,74**	1,13 (\pm 0,39)	0,89 (\pm 0,38)	0,24 b	1,07 (\pm 0,34)	0,70 (\pm 0,35)	0,37 a	0,93 (\pm 0,60)	0,52 (\pm 0,61)	0,42 a
10 — 20	6,01**	1,36 (\pm 0,34)	1,16 (\pm 0,49)	0,20 b	1,33 (\pm 0,21)	1,08 (\pm 0,24)	0,25 b	1,33 (\pm 0,24)	0,90 (\pm 0,19)	0,43 a
20 — 30	8,48**	1,47 (\pm 0,42)	1,24 (\pm 0,39)	0,23 b	1,46 (\pm 0,29)	1,22 (\pm 0,29)	0,24 b	1,31 (\pm 0,20)	0,96 (\pm 0,17)	0,35 a
30 — 40	9,70**	1,43 (\pm 0,20)	1,30 (\pm 0,17)	0,13 b	1,42 (\pm 0,24)	1,14 (\pm 0,30)	0,29 a	1,18 (\pm 0,30)	0,88 (\pm 0,28)	0,30 a
40 — 50	98,78**	1,47 (\pm 0,35)	1,37 (\pm 0,35)	0,11 c	1,37 (\pm 0,29)	1,14 (\pm 0,29)	0,23 b	1,25 (\pm 0,33)	0,90 (\pm 0,33)	0,35 a
50 — 60	4,54*	1,62 (\pm 0,65)	1,51 (\pm 0,63)	0,11 b	1,52 (\pm 0,43)	1,31 (\pm 0,42)	0,20 ab	1,28 (\pm 0,25)	1,03 (\pm 0,23)	0,25 a
60 — 70	4,44*	1,75 (\pm 0,65)	1,55 (\pm 0,61)	0,20 a	1,62 (\pm 0,48)	1,43 (\pm 0,48)	0,20 a	1,45 (\pm 0,42)	1,17 (\pm 0,35)	0,28 a
70 — 80	0,18 ns	1,73 (\pm 0,81)	1,47 (\pm 0,79)	0,26	1,70 (\pm 0,68)	1,42 (\pm 0,68)	0,28	1,59 (\pm 0,62)	1,28 (\pm 0,51)	0,31

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; AT: após tráfego; ST: sem tráfego; Δ : diferença considerando condição após e sem tráfego.

Observando a Figura 16, a qual apresenta as diferenças percentuais da resistência do solo à penetração entre as situações sem tráfego e após tráfego das máquinas de colheita da madeira para as diferentes classes de umidade e profundidade nos dois solos, pode se ver que no CHa, as maiores diferenças na resistência à penetração com aumento da umidade do solo, ocorreram nas camadas mais profundas do solo, chegando a atingir valores superiores a 40 %. Tal resultado foi semelhante ao obtido por Nambiar (1996), que cita que as operações de colheita efetuada em solos secos sofrem menor compactação em comparação a solos úmidos. Neste solo, nas em todas as camadas a diferença percentual tendeu a aumentar com a elevação da umidade, mostrando que essa elevação deixa o solo mais susceptível às modificações exercidas pelas operações de colheita da madeira.

O maior efeito do aumento da umidade no RRh, foi mais pronunciado na camada superficial de solo, provocando um acréscimo em torno de 35 % na resistência à penetração, sendo que para o restante do perfil de solo, as diferenças foram menos acentuadas mesmo com o aumento da umidade, sendo o tráfego das máquinas causou acréscimos entre 15 a 20 % na resistência do solo à penetração.

Muitas das explicações dadas para a densidade e porosidade total, também podem ser aplicadas para a resistência à penetração. Em geral, com os resultados obtidos, fica evidente que a umidade foi determinante na resposta dos solos quando submetidos ao tráfego de máquinas de colheita da madeira. Por isso, novamente, confirma-se a necessidade de adoção de medidas que minimizem os efeitos da compactação dos solos. Assim, a degradação causada pelo tráfego das máquinas sobre o solo, e as consequentes perdas de produtividade, poderão ser reduzidas.

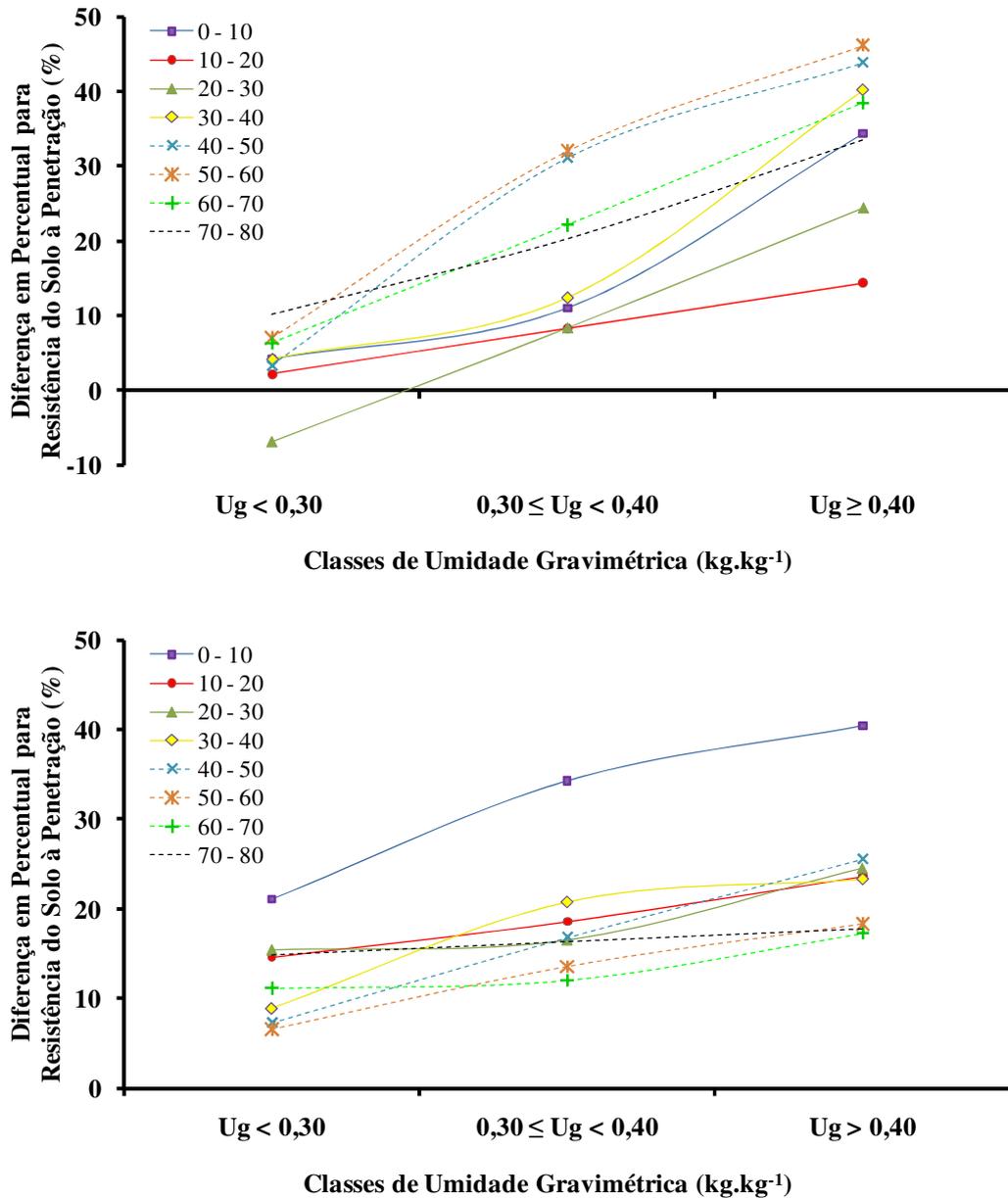


Figura 16. Diferenças médias percentuais da resistência do solo à penetração considerando após e sem tráfego nas diferentes classes de umidade gravimétrica para as profundidades avaliadas no CHa (a) e no RRh (b).

4.3.4. Relações entre a resistência à penetração e os outros atributos avaliados

4.3.4.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)

Na Tabela 11 são mostrados os valores da estatística descritiva para as variáveis avaliadas do CHa após a análise exploratória dos dados. Como pode ser visto, a resistência à penetração (RP) apresentou elevado coeficiente de variação (34,69 %) e grande amplitude dos

valores, concordando com Gomes (1984). Tal fato pode ser devido a alta variabilidade do solo, bem como por outros fatores que interferiram na sua determinação em condições de campo, que foram a presença de pedras e resíduos da colheita de madeira (galhos, cascas, acículas e etc.), e raízes das árvores e plantas do sub-bosque que se formou abaixo do povoamento. Esses fatores podem ter influenciado não somente na determinação dessa variável, como das outras da mesma forma. As operações de colheita da madeira, geralmente, não atingem toda área e, conseqüentemente, o grau de variabilidade e a heterogeneidade da compactação e perturbação do solo é grande nas florestas (GREACEN e SANDS, 1980).

Tabela 11. Estatística descritiva para as variáveis avaliadas no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Variável	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mediana	Máximo	Mínimo	N
Ds (g.cm ⁻³)	1,20	0,16	13,69	1,21	1,71	0,72	248
RP (MPa)	1,54	0,54	34,69	1,55	3,03	0,26	248
Pt (m ³ .m ⁻³)	0,51	0,068	13,39	0,516	0,700	0,303	248
Ug (kg.kg ⁻¹)	0,348	0,077	22,00	0,345	0,572	0,164	248

Ds: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; Pt: porosidade total do solo; Ug: umidade gravimétrica; N: número de repetições; CV: coeficiente de variação.

Verificando as relações entre a resistência e outras variáveis (Figura 17), pode se observar que a densidade do solo (Ds) teve relação direta com a resistência à penetração (RP) ($R^2 = 0,6093$), o que também foi visto por Ampoorter *et al.* (2007), em um estudo de dois solos de textura arenosa após a colheita de madeira. Com o acréscimo na densidade, houve aumento da resistência do solo à penetração, confirmando a relação direta e positiva entre as variáveis.

A relação entre a resistência do solo à penetração (RP) e a porosidade total (Pt) foi inversa ($R^2 = 0,4937$), porém, não houve uma alta dependência entre as duas variáveis nas condições desse solo. Em respeito à umidade gravimétrica (Ug), se observa que com o aumento dos valores desta variável no solo, houve decréscimo na resistência à penetração (RP), podendo, então, se ver que essas duas variáveis apresentaram relação direta e inversa ($R^2 = 0,6464$). Esta observação é diferente em relação ao que foi relatado por Barreto

Riquelme (2004) que verificou, por meio de regressões lineares, que a umidade explicou apenas 20 % da variação da resistência à penetração.

Através dessas relações, percebeu-se que a umidade foi a variável que teve maior relação com a resistência do solo à penetração, mostrando dessa forma, exercer grande influência sobre a susceptibilidade dos solos, diminuindo sua resistência às alterações causadas pelo tráfego de máquinas. Por isso, há a necessidade do controle de tráfego em condições desfavoráveis de umidade, contribuindo para minimizar os efeitos da compactação e, conseqüentemente, sobre o desenvolvimento das futuras rotações.

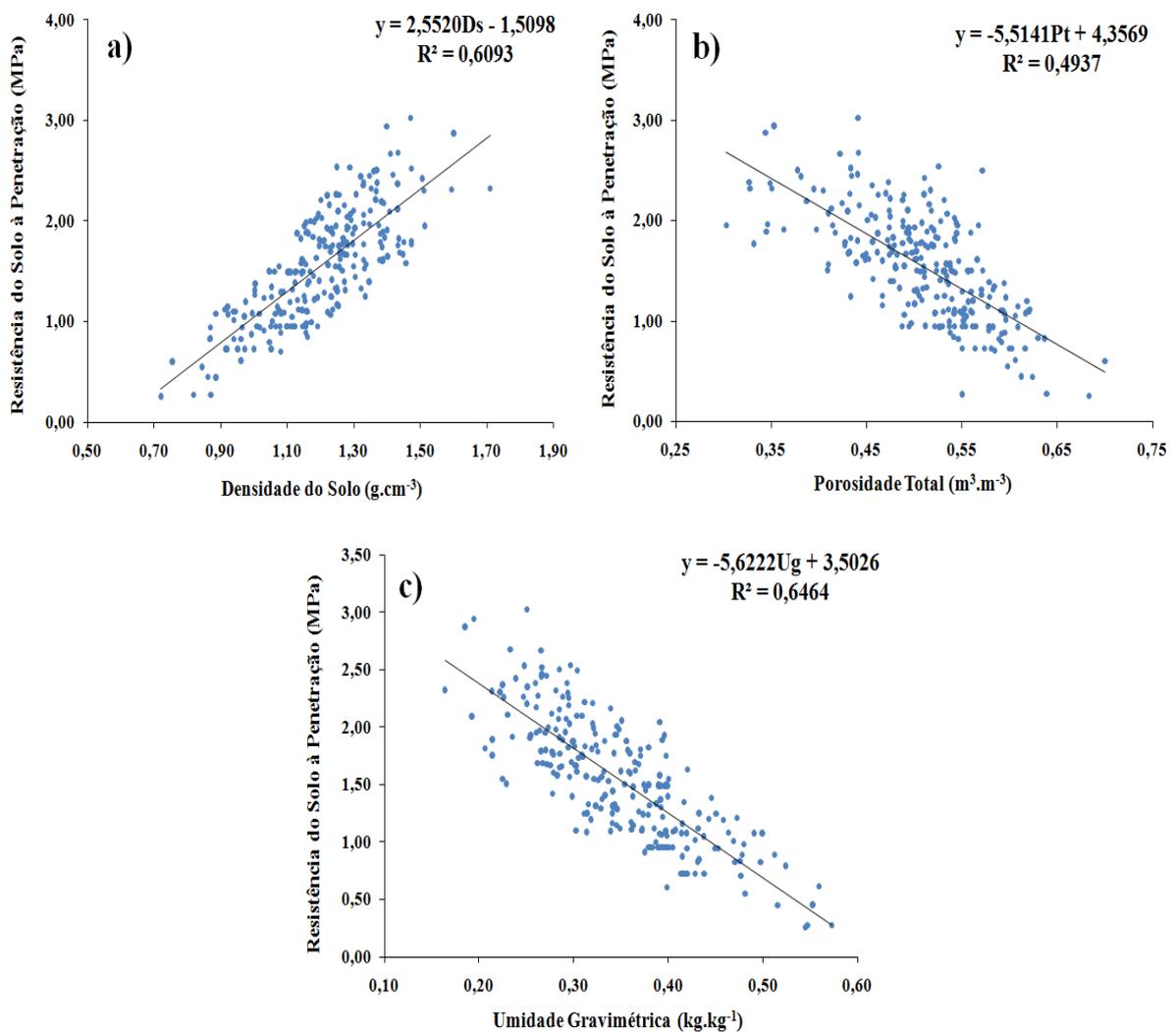


Figura 17. Regressões lineares no CHa entre: **a)** densidade do solo e resistência à penetração; **b)** porosidade total e resistência à penetração; **c)** umidade gravimétrica e resistência à penetração; regressões considerando 5% de significância.

4.3.4.2. Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh)

A resistência à penetração (RP), para este solo, também apresentou um alto coeficiente de variação (26,60 %) e amplitude dos valores (Tabela 12). Os fatores que podem ter influenciado os valores obtidos foram os mesmos discutidos anteriormente, podendo ser a elevada variabilidade do solo e as condições de campo.

Tabela 12. Estatística descritiva para as variáveis avaliadas no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Variável	Média	Desvio padrão	CV	Mediana	Máximo	Mínimo	N
			%				
Ds (g.cm ⁻³)	1,24	0,08	6,79	1,24	1,59	1,04	186
RP (MPa)	1,36	0,36	26,60	1,30	3,26	0,68	186
Pt (m ³ .m ⁻³)	0,490	0,063	12,79	0,492	0,709	0,339	186
Ug (kg.kg ⁻¹)	0,354	0,055	15,67	0,362	0,493	0,216	186

Ds: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; Pt: porosidade total do solo; Ug: umidade gravimétrica; N: número de repetições; CV: coeficiente de variação.

Através da Figura 18, é possível verificar entre a densidade do solo (Ds) e a resistência à penetração (RP) um coeficiente de determinação (R^2) de 0,5390, ou seja, pode se dizer que as duas variáveis tem relação direta. De acordo com Borges *et al.* (1999), vários trabalhos de pesquisa têm mostrado a relação direta entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo. Acréscimos em densidade resultaram em aumentos na resistência à penetração.

Relação inversa também foi verificada entre a resistência do solo à penetração (RP) e a porosidade total (Pt) ($R^2 = 0,2685$). Como se observa, essas duas propriedades têm baixa dependência, devendo-se, segundo Silva (2003), ao fato da resistência à penetração ser uma medida eficiente para caracterizar camadas compactadas, porém não sendo capaz de identificar rachaduras e poros do solo. Com a umidade gravimétrica (Ug), a resistência à penetração (RP) apresentou relação inversa como esperado ($R^2 = 0,4345$), se verificando uma grande dependência entre as duas variáveis.

Pelos resultados, percebe-se que, de acordo com Vieira (1985), as características físicas do solo são interdependentes e, com isso, a modificação de uma delas, normalmente, leva à modificação de todas as demais. Por outro lado, também se constatou que há uma

grande complexidade por trás das relações entre as variáveis. Isso, como confirmam Matthies e Watson (1989), se deve à grande variabilidade de fatores que afetam a compactação. Assim, entender as relações entre as variáveis que explicam esse processo é dificultado ao máximo, principalmente em condições de campo.

Ainda deve ser ressaltada, a grande relação entre a umidade e a resistência do solo à penetração. Por isso, deve-se levar em conta que, de uma maneira geral, a umidade causa alterações na susceptibilidade do solo, devendo haver cuidado e restrições do tráfego das máquinas, para não haver maiores problemas relacionados à compactação.

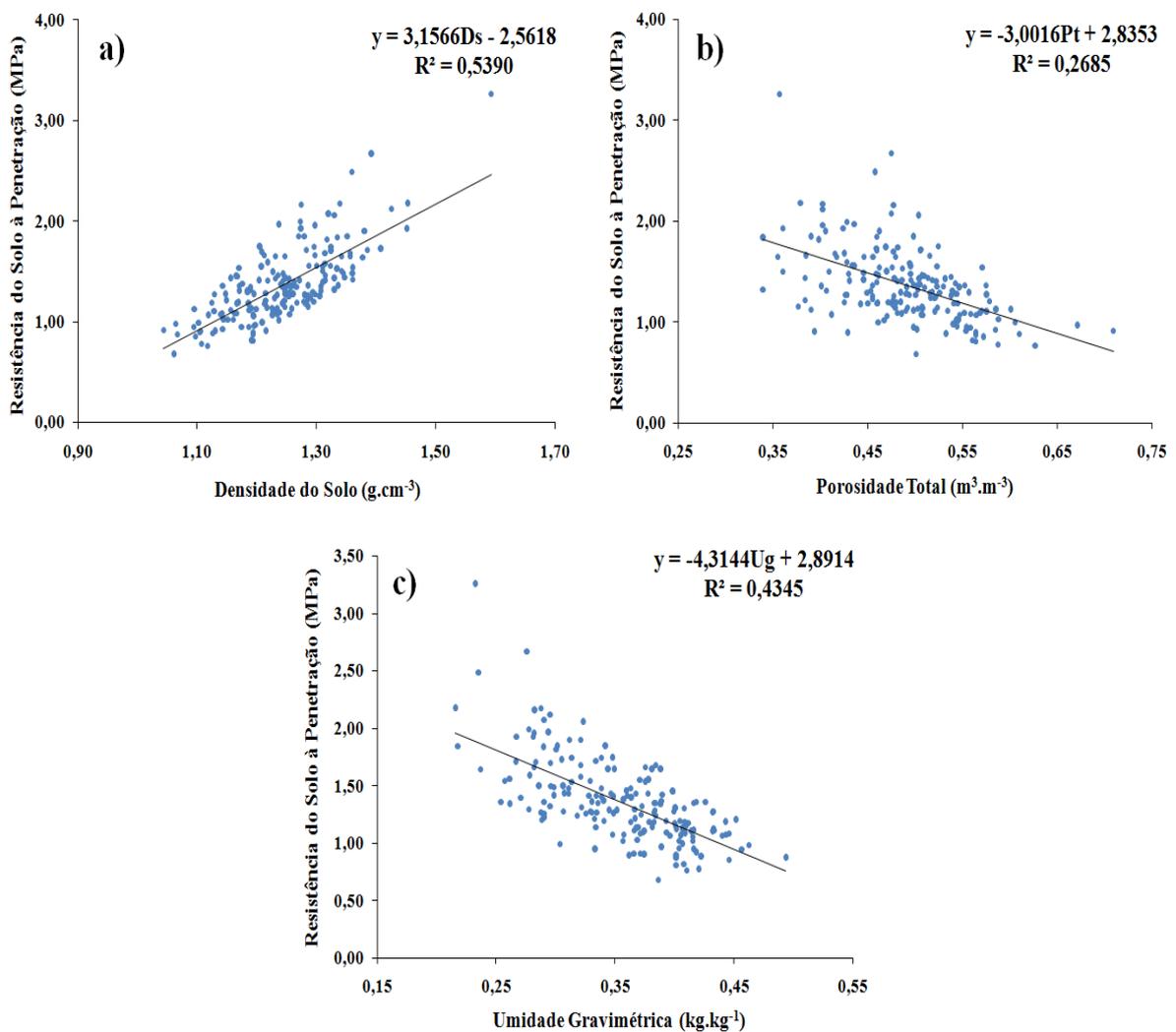


Figura 18. Regressões lineares no RRh entre: **a)** densidade do solo e resistência à penetração; **b)** porosidade total e resistência à penetração; **c)** umidade gravimétrica e resistência à penetração; regressões considerando 5% de significância.

4.3.5. Estimativa da resistência do solo à penetração

4.3.5.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)

Após serem verificadas as relações entre a resistência à penetração e a outras variáveis, procedeu-se, então, com o ajuste e desenvolvimento de equações por meio de regressão múltipla. Nas equações (Tabela 13), a densidade do solo (D_s) e a umidade gravimétrica (U_g) são usadas como variáveis explicativas da resistência do solo à penetração (RP), estando presentes em todas as equações. A resistência à penetração tem relação direta com a densidade (RIBON e TAVARES FILHO, 2008) e relação inversa com a umidade do solo (CORRECHEL *et al.*, 1999).

A primeira equação (MAVP) se caracterizou por estimar a RP usando os valores de D_s e U_g de forma pura, sem modificar a unidade dessas variáveis. Já para o desenvolvimento das equações com variáveis mistas (MSAM e MSLM), usou-se o ajuste “passo a passo” do procedimento *Stepwise*, sendo testados o uso de combinações das variáveis de forma pura, inversa, potencializada e logaritimizada por logaritmo neperiano. Esse processo (*Stepwise*) selecionou as variáveis independentes que melhor se relacionaram com a variável dependente. Valentin (2000) afirma que esse processo é um dos métodos mais recomendados para uma seleção criteriosa das variáveis explicativas, no estabelecimento de um modelo multilinear.

Na segunda equação (MSAM) verificou-se que a variável dependente (RP) possuiu melhor relação com a D_s inversa, e a U_g de forma pura. A terceira equação teve como variáveis explicativas a D_s de forma inversa e a U_g potencializada.

A última equação (MBLA) usada nas comparações se trata do modelo proposto por Busscher (1990) de forma linearizada e adaptada. Para o uso deste modelo, primeiramente foi realizada sua linearização, usando o logaritmo neperiano, e em seguida trocou-se do modelo original a variável umidade volumétrica (θ , $m^3.m^{-3}$) pela variável umidade gravimétrica (U_g , $kg.kg^{-1}$). De acordo com Reichert *et al.* (2007), esse modelo tem sido amplamente utilizado em estudos de compactação e qualidade do solo.

Tabela 13. Modelos selecionados para estimativa da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Siglas	Modelos	Tipos dos Modelos
MAVP	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds + \beta_2 Ug$	Modelo Aritmético com Variáveis Puras
MSAM	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds^{-1} + \beta_2 Ug$	Modelo <i>Stepwise</i> Aritmético com variáveis Mistas
MSLM	$\text{Ln RP} = \text{Ln } \beta_0 + \beta_1 Ds^{-1} + \beta_2 Ug^3$	Modelo <i>Stepwise</i> Logarítmico com variáveis Mistas
MBLA	$\text{Ln RP} = \text{Ln } \beta_0 + \beta_1 \text{Ln Ug} + \beta_2 \text{Ln Ds}$	Modelo de Busscher (1990) Linearizado e Adaptado

Ln: logaritmo neperiano; RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Ug: umidade gravimétrica; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes empíricos de ajuste.

Dentre os modelos testados, o modelo por *Stepwise* aritmético com variáveis mistas (MSAM) apresentou o melhor coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) com 0,7134, seguido pelo modelo aritmético com variáveis puras (MAVP) (R^2 aj = 0,7115), e pelo MSLM (R^2 aj = 0,7085) (Tabela 15). O erro-padrão da estimativa absoluto e percentual para os dois modelos com melhor R^2 aj (MSAM e MAVP), foi de 0,2874 MPa e 18,64 %, respectivamente, para o MSAM, e de 0,2883 MPa e 18,70 %, respectivamente, para o MAVP. Em relação ao valor de F, o MSAM (F = 308,35) se mostrou superior ao MAVP (F = 305,55). Na distribuição gráfica de resíduos (Figura 19), não houve diferenças acentuadas entre os três primeiros modelos (MAVP, MSAM e MSLM), sendo que o MBLA teve a pior distribuição.

Em geral, considerando todas as avaliações estatísticas, o modelo por *Stepwise* aritmético com variáveis mistas (MSAM) se mostrou o melhor para a estimativa da resistência do solo à penetração, seguido pelo MAVP. Nota-se ainda, que o modelo proposto por Busscher (1990) linearizada e adaptado (MBLA) foi o pior em todas as avaliações, salientando que em todas as estatísticas, para este modelo e para o MSLM, estas foram recalculadas para a variável de interesse, ou seja, para RP em MPa.

Tabela 14. Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Modelo	Equações	R ² aj	Syx	Syx (%)	Valor F	N
MAVP	$RP = 1,16^{**} + 1,33^{**}Ds - 3,47^{**}Ug$	0,7115	0,2883	18,70	305,55	248
MSAM	$RP = 4,21^{**} - 1,67^{**}Ds^{-1} - 3,59^{**}Ug$	0,7134	0,2874	18,64	308,35	248
MSLM	$\text{Ln } RP = 1,91^{**} - 1,46^{**}Ds^{-1} - 6,20^{**}Ug^3$	0,7085	0,2898	18,80	301,19	248
MBLA	$\text{Ln } RP = -0,66^{**} - 0,72^{**}\text{Ln } Ug + 1,45^{**}\text{Ln } Ds$	0,6129	0,3340	21,66	196,52	248

*significativo a 5 %; **significativo a 1 %; Ln: logaritmo neperiano; RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Ug: umidade gravimétrica; R² aj: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro-padrão da estimativa em MPa; N: número de repetições.

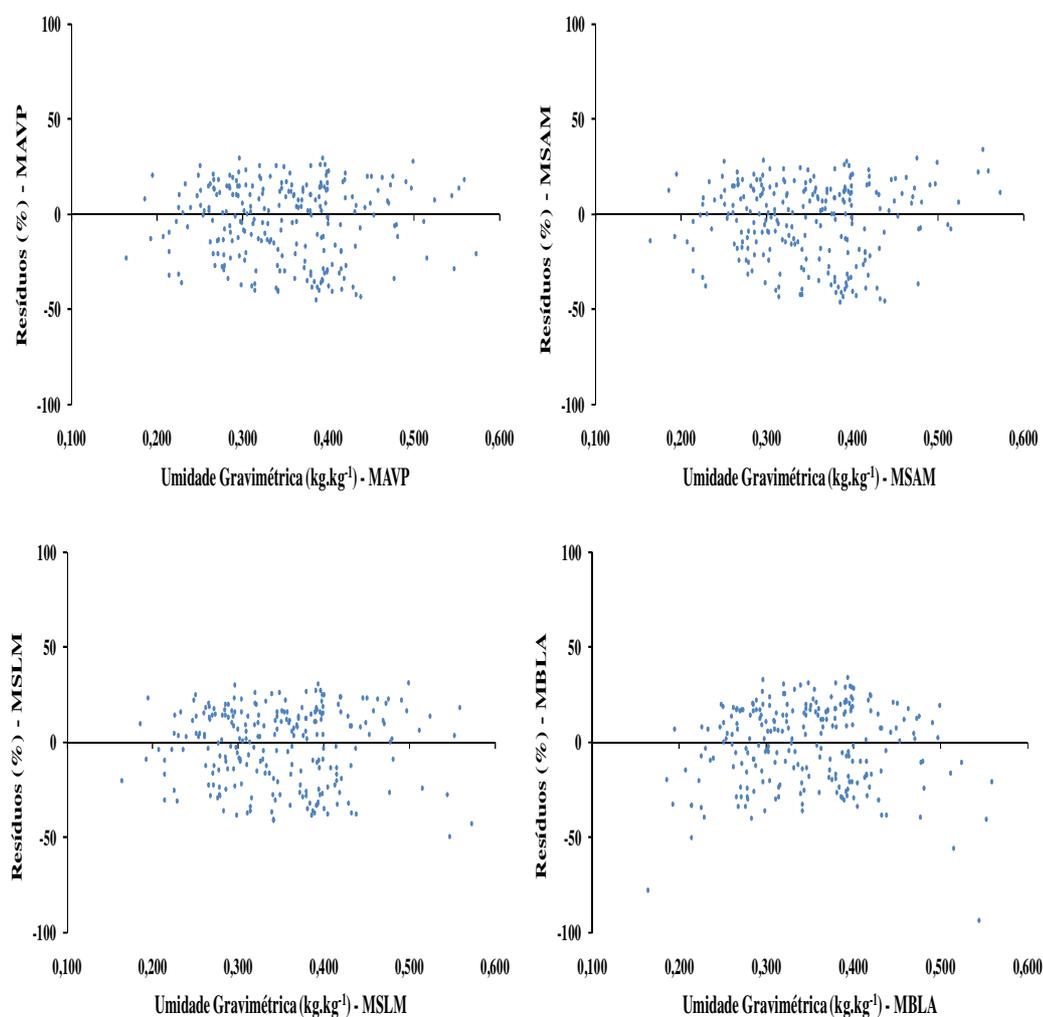


Figura 19. Distribuição porcentual dos resíduos em relação à umidade gravimétrica no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

A Figura 20 mostra a aplicação do modelo que teve melhor ajuste (MSAM), de acordo com os critérios escolhidos. É possível observar a variação da resistência do solo à penetração (RP estimada) em função da umidade gravimétrica (Ug) e da densidade do solo (Ds), podendo se ver que com a diminuição da umidade e aumento da densidade do solo, ocorrem os maiores valores de RP estimada, sendo que ao contrário, com o aumento da umidade e diminuição da densidade, ocorrem menores valores de RP estimada. Esse fato, concorda com Lima *et al.* (2007), que também observou essa relação.

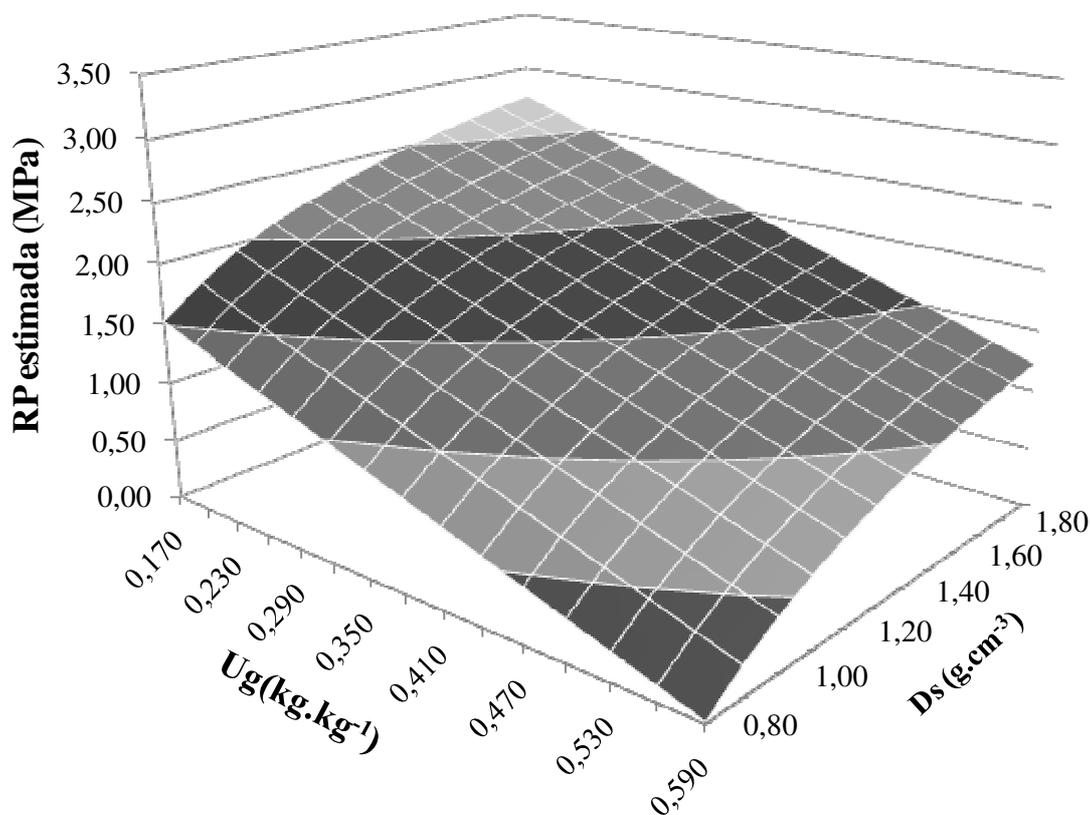


Figura 20. Resistência à penetração estimada (RP estimada) pelo Modelo por *Stepwise* Aritmético com variáveis Mistas (MSAM) em função da umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Os resultados também evidenciaram que existem outros fatores que influenciam o comportamento da resistência do solo à penetração, podendo ser a textura e a matéria orgânica, como relataram Smith *et al.* (1997). Estes autores, trabalhando em áreas florestais, estabeleceram modelos de regressão mostrando que a relação entre a resistência à penetração, e densidade do solo e o conteúdo de água foi influenciada pelo conteúdo de argila e carbono

orgânico para solos com menos de 30 % de argila e somente pelo conteúdo de argila para solos com mais de 30 % de argila. Assim, se pode afirmar que a resistência mecânica à penetração é dependente da umidade, densidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas (BUSSCHER, 1990; CANARACHE, 1990; PABIN *et al.*, 1998), como também do conteúdo de matéria orgânica, como visto por Carter (1990) e Ribon e Tavares Filho (2004).

Além disso, é importante ressaltar os elevados valores de coeficiente de variação (CV) da RP (Tabela 11), ocasionados pela variabilidade do solo e outros fatores. Silva *et al.* (2004) mencionam que a determinação da resistência do solo à penetração a campo é fortemente influenciada pelas condições do manejo do solo e pela intensidade de tráfego das máquinas.

De um modo geral, as equações desenvolvidas possibilitaram uma melhor compreensão dessa propriedade do solo, que apresentou grande variabilidade, mostrando que as relações entre as variáveis do processo de compactação apresentam complexidade para serem explicadas, principalmente em condições de campo (RIBON e TAVARES FILHO, 2004). Para Cornelis *et al.* (2001), o uso de modelagens estatísticas proporcionam grandes evoluções em termos de exatidão, e são válidos os estudos dessa natureza, pois possibilitam a uma melhor compreensão dos atributos que influenciam a compactação do solo.

4.3.5.2. Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh)

Neste solo, notam-se algumas diferenças nas variáveis das equações selecionadas para a estimativa da resistência à penetração (Tabela 15), em relação ao outro solo.

A equação aritmética com variáveis puras (MAVP) permaneceu a mesma, enquanto a segunda equação (MSAM) teve como variáveis explicativas selecionadas pelo procedimento *Stepwise*, a densidade potencializada e umidade de forma inversa e potencializada, mostrando que essas variáveis dessa forma se relacionaram melhor com a resistência à penetração.

Já equação por *Stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) apresentou como variáveis explicativas a Ds de forma potencializada e a Ug inversa. A equação baseada no modelo proposto por Busscher (1990) de forma linearizada e adaptada, ainda continuou a usar a variáveis Ug e Ds, sendo estas relacionadas de forma logarítmica com a Ln RP.

Tabela 15. Modelos selecionados para estimativa da resistência do solo à penetração no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Siglas	Modelos	Tipos dos Modelos
MAVP	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds + \beta_2 Ug$	Modelo Aritmético com Variáveis Puras
MSAM	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds^2 + \beta_2 Ug^{-2}$	Modelo <i>Stepwise</i> Aritmético com variáveis Mistas
MSLM	$\text{Ln } RP = \text{Ln } \beta_0 + \beta_1 Ds^2 + \beta_2 Ug^{-1}$	Modelo <i>Stepwise</i> Logarítmico com variáveis Mistas
MBLA	$\text{Ln } RP = \text{Ln } \beta_0 + \beta_1 \text{Ln } Ug + \beta_2 \text{Ln } Ds$	Modelo de Busscher (1990) Linearizado e Adaptado

Ln: logaritmo neperiano; RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Ug: umidade gravimétrica; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes empíricos de ajuste.

As estatísticas de avaliações dos modelos mostraram que o modelo por *Stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) obteve os melhores resultados, tendo um coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) de 0,6069, e erro-padrão da estimativa absoluto e percentual de 0,2276 MPa e 16,68 %, respectivamente. Dentre os outros modelos testados, o modelo por *Stepwise* aritmético com variáveis mistas (MSAM) foi o segundo melhor, apresentando um R^2 aj de 0,5918, e erro-padrão da estimativa absoluto e percentual de 0,2319 MPa e 17,00 %, respectivamente. Já o primeiro e quarto modelos (MAVP e MBLA) foram os piores, tendo os menores R^2 aj e os maiores erro-padrão da estimativa absoluto e percentual, lembrando que em todas as estatísticas para os modelos que estimam a RP de forma logarítmica, estas foram recalculadas para a variável de interesse (RP em MPa).

Um dos motivos que podem ter levado o modelo MSLM apresentar as melhores estatísticas reside no fato de que as variáveis independentes (Ds e Ug) são relacionadas de forma não-linear com a variável dependente (RP), principalmente a variável Ds que melhor se relacionou com a RP, como visto anteriormente. Evidências da relação não-linear entre a resistência à penetração e a densidade foram detectadas por Vaz *et al.* (2001) e Whalley *et al.* (2005), para solos em várias classes texturais, comprovando a alta dependência dessas duas variáveis. A distribuição percentual dos resíduos (Figura 21) mostrou que nenhum dos modelos teve um ajuste tão superior em relação aos outros, para que chegassem a ser detectadas diferenças acentuadas nos resíduos.

Pelos ajustes dos modelos selecionados, percebe-se que podem existir a influência de outros fatores na estimativa desse atributo, os quais podem ser os mesmos que já foram discutidos anteriormente para o outro solo (CHa). O estudo da modelagem e das relações

entre as variáveis são importantes para melhor se entender a compactação do solo. O aumento na compreensão desse processo vem permitindo avaliar alternativas para a sua minimização (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996).

Aplicando-se o modelo que obteve o melhor ajuste, se percebe novamente a variação da resistência do solo à penetração em função da umidade gravimétrica e da densidade para este solo (Figura 22).

Tabela 16. Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Modelo	Equações	R ² aj	Syx	Syx (%)	Valor F	N
MAVP	$RP = -0,86 + 2,29^{**}Ds - 1,25^{**}Ug$	0,5664	0,2391	17,52	121,81	186
MSAM	$RP = -0,34^{*} + 0,91^{**}Ds^2 + 0,03^{**}Ug^{-2}$	0,5918	0,2319	17,00	135,12	186
MSLM	$\text{Ln } RP = -1,11^{**} + 0,64^{**}Ds^{-2} + 0,14^{**}Ug^{-1}$	0,6069	0,2276	16,68	143,79	186
MBLA	$\text{Ln } RP = -0,60^{**} - 0,43^{**}\text{Ln } Ug + 1,95^{**}\text{Ln } Ds$	0,5914	0,2321	17,01	134,86	186

*significativo a 5 %; **significativo a 1 %; Ln: logaritmo neperiano; RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Ug: umidade gravimétrica; R² aj: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro-padrão da estimativa em MPa; N: número de repetições.

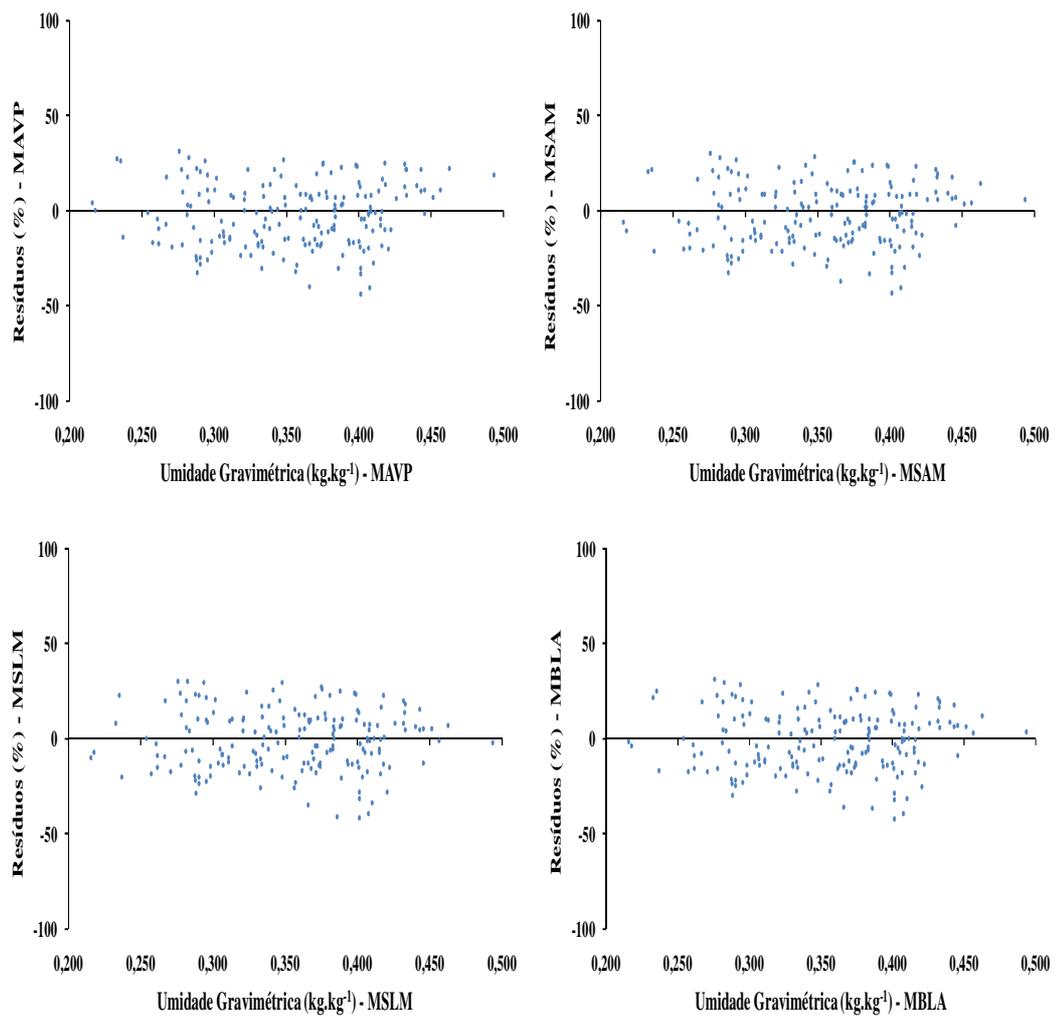


Figura 21. Distribuição porcentual dos resíduos em relação à umidade gravimétrica no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

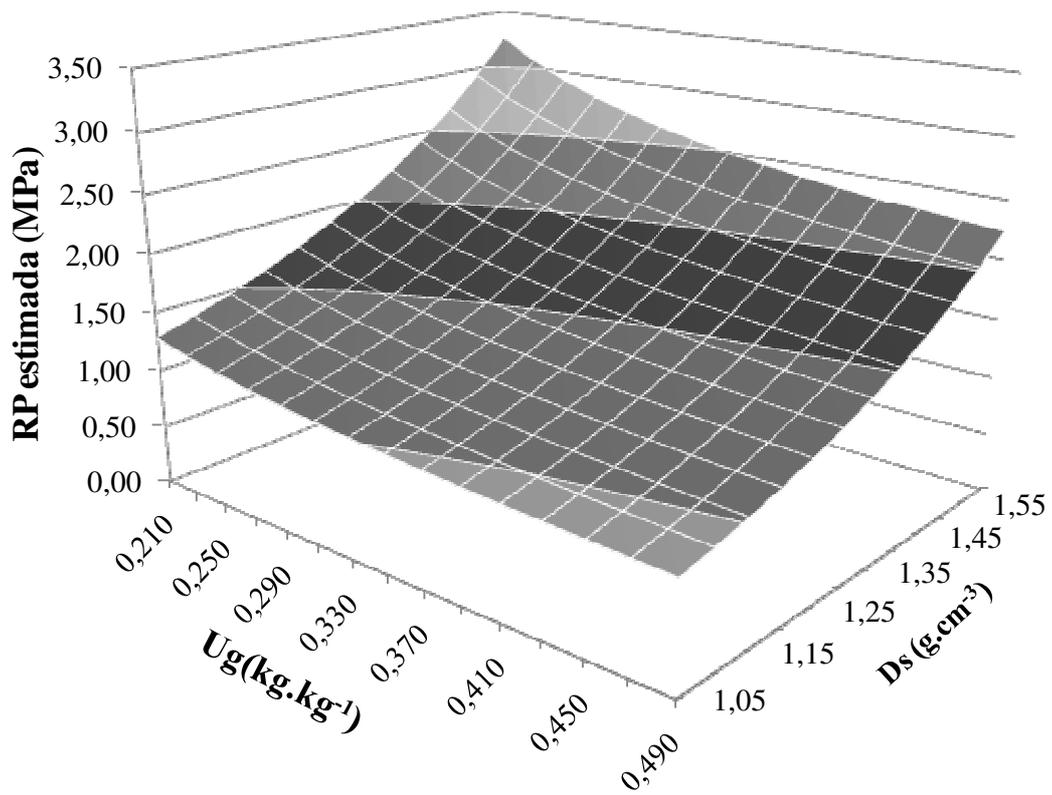


Figura 22. Resistência à penetração estimada (RP estimada) pelo Modelo por *Stepwise* Logarítmico com variáveis Mistas (MSLM) em função da umidade gravimétrica (Ug) e densidade do solo (Ds) no Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

4.4. CONCLUSÕES

De acordo com a análise e discussão dos resultados, as principais conclusões deste capítulo foram:

- A umidade exerceu grande influência sobre a resistência dos solos em relação ao tráfego das máquinas de colheita da madeira, sendo que as maiores alterações nas propriedades físicas avaliadas, ocorreram com o aumento da umidade dos solos;

- As alterações na densidade, porosidade total e resistência à penetração do Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh), foram mais acentuadas na camada superficial do solo mesmo com a elevação da umidade gravimétrica, enquanto no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa), o aumento da umidade ocasionou alterações acentuadas em todo o perfil do solo, sendo que este se mostrou mais susceptível;

- Nos solos estudados houve alterações na resistência à penetração até 80 cm de profundidade, havendo valores acima de 2 e 3 MPa em algumas situações no CHa, sendo que no RRh não se constataram tais valores de resistência à penetração;

- A densidade (D_s) e a umidade gravimétrica (U_g) apresentaram forte relação com a resistência do solo à penetração (RP), sendo que os melhores modelos ajustados para a estimativa da resistência à penetração, explicaram 71 e 69 % da variação desta variável no CHa e RRh, respectivamente.

5. CAPÍTULO II

AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE FELLER-BUNCHER E SKIDDER NA COMPACTAÇÃO DE SOLOS FLORESTAIS

5.1. INTRODUÇÃO

Durante as operações de colheita da madeira, as máquinas trafegam várias vezes sobre a mesma trilha, o que pode causar a compactação do solo, ocasionando o impedimento mecânico ao crescimento radicular, resultando em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor desenvolvimento das plantas.

A compactação é um processo que resulta em mudanças desfavoráveis nos atributos do solo, aumentando a densidade, reduzindo a porosidade e trazendo incremento na resistência mecânica à penetração. O nível de compactação sofrido pelo solo depende de vários fatores, no entanto, um dos fatores de maior influência é o número de passadas das máquinas.

De acordo com Bettinguer *et al.* (1994) *apud* Camargo (1999), as passadas repetidas das máquinas de colheita, principalmente na etapa de extração florestal, comprimem a massa do solo, resultando num aumento significativo da compactação do mesmo.

Para Seixas (2000), o efeito do tráfego dos tratores florestais sobre o solo é maior nas primeiras passadas, sendo que o aumento da densidade nas trilhas de tráfego está relacionado com o número de passadas, o teor de matéria orgânica e o tipo de máquinas e rodados utilizados. Seixas e Souza (2007) relatam que aproximadamente 80 % da variação da compactação do solo, avaliada pela densidade do solo, ocorreu depois de cinco passadas do trator agrícola mais carreta carregada sobre o mesmo local. Camargo (1999), estudando um sistema de colheita da madeira composto por *Feller-buncher* e *Skidder*, verificou que o nível de compactação atingida foi similar para distintas passadas das máquinas em um Cambissolo Álico de textura franco-argilosa.

Burger *et al.* (1989) *apud* Oliveira Júnior (1998) compararam os efeitos de tamanho dos pneus e da intensidade de tráfego nas propriedades físicas do solo, concluindo que a intensidade de tráfego teve maior influência que o tamanho dos pneus. De modo semelhante Aust *et al.* (1993), avaliando o impacto causado ao solo por sete tipos de pneus em quatro níveis de tráfego, constataram que houve um aumento proporcional dos distúrbios ao solo

com o aumento do nível de tráfego, sendo a primeira passada aquela que provocou a maior variação de densidade do solo, concluindo-se então, que o fator de maior influência foi o nível de tráfego e não os tipos de pneus utilizados.

Silva *et al.* (2007), avaliando o tráfego de um *Forwarder* na extração, com diferentes cargas e número de passadas, relataram que o efeito das passadas foi maior do que o efeito das cargas. Segundo Greacen e Sands (1980), o acréscimo da carga não aumenta, necessariamente, a compactação do solo, pois pode ocorrer aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga. Os mesmos autores ainda comentam que o grau de compactação depende da carga dinâmica aplicada, da pressão interna dos pneus e das múltiplas passadas das máquinas, porém o efeito varia de acordo com o tipo de solo avaliado.

Diante do exposto, percebe-se a importância de melhor entender os efeitos do tráfego sobre as propriedades do solo, possibilitando auxílio na tomada de decisão e no planejamento da colheita de madeira para a diminuição da compactação do solo, minimizando os danos ao meio ambiente, possibilitando a sustentabilidade e melhoria na produção de madeira.

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas de colheita da madeira na compactação de diferentes solos florestais em povoamentos de *Pinus taeda L.*

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Caracterização da área de estudo

5.2.1.1. Localização e clima

Esta pesquisa foi conduzida nas áreas de colheita da madeira da empresa Battistella Florestal, nas Fazendas Cerro Azul B e São Pedro, localizadas nos municípios de Dr. Pedrinho e Rio Negrinho, respectivamente, região Norte do Estado de Santa Catarina.

O município de Dr. Pedrinho localiza-se entre os paralelos 26°42'52'' S e 49°29'00'' W, e altitude média de 530 m. O clima da região, segundo KÖPPEN, é classificado como mesotérmico úmido (Cfb), sem estação seca, com verões quentes e inverno rigoroso, temperatura média anual de 19,7 °C, e precipitação média anual entre 1.600 a 1.700 mm (GAPLAN, 1986).

O município de Rio Negrinho está localizado entre os paralelos 26°15'16'' S e 49°31'06'' W, e altitude média de 790 m. O clima da região é classificado, segundo KÖEPEN, como mesotérmico úmido (Cfb), sem estação seca, com verões frescos e inverno rigoroso, temperatura média anual de 18,3 °C, e precipitação média anual entre 1.360 a 1.670 mm (EPAGRI/CIRAM, 2006; KOBIYAMA et. al., 2004).

5.2.1.2. Histórico, solos e povoamento florestal

De acordo com a empresa, as duas áreas de estudo têm o histórico de terem sido utilizadas no passado para fins de produção agropecuária, havendo campos de pastagens antes de serem incorporada ao sistema de produção florestal.

O solo da área de estudo da Fazenda Cerro Azul B foi classificado como um Cambissolo Húmico Aluminíco típico (CHa) de textura franco-argilo-arenosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado.

A área de estudo da Fazenda São Pedro teve o solo classificado como um Neossolo Litólico Húmico típico (RLh) de textura areno-argilosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado, havendo contato com a rocha a partir de 50 cm de profundidade. A classificação dos solos das duas áreas foi realizada pela própria empresa, sendo conferida a campo por meio da abertura de perfis.

Em cada solo avaliado, foram coletadas cinco amostras deformadas com o uso de um trado holandês, nas profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, para determinação da granulometria e do teor de carbono orgânico. A granulometria, o teor de carbono orgânico e a umidade gravimétrica média (no momento da coleta de dados) dos solos das duas áreas de estudo, encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17. Granulometria, teor de carbono orgânico (C-org) e umidade gravimétrica média (Ug) para os solos e profundidades avaliadas.

Profundidades (cm)	Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)				
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	C-org (g.dm ⁻³)	Ug (kg.kg ⁻¹)
0 ─ 15	647,0	133,0	220,0	21,03	0,530
15 ─ 30	634,3	153,7	212,0	20,25	0,402
30 ─ 50	640,2	59,8	300,0	18,31	0,404

Profundidades (cm)	Neossolo Litólico Húmico típico (RLh)				
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	C-org (g.dm ⁻³)	Ug (kg.kg ⁻¹)
0 ─ 15	455,4	112,6	432,0	25,69	0,258
15 ─ 30	478,2	91,8	430,0	21,01	0,239
30 ─ 50	486,0	34,0	480,0	22,32	0,235

Os dados referentes às características dos povoamentos florestais, da primeira e da segunda área de estudo, são detalhados na Tabela 18.

Tabela 18. Características dos povoamentos florestais das áreas de estudo.

Fazenda	Cerro Azul B	São Pedro
Espécie	<i>Pinus taeda</i> L.	<i>Pinus taeda</i> L.
Idade de corte (anos)	± 35	± 24
Área basal (m ² .ha ⁻¹)	45,82	34,65
Número médio de árvores/ha	442	340
Diâmetro médio (cm)	36,10	35,76
Altura média (m)	29,43	27,64
Volume médio individual (m ³)	1,48	1,33
Volume médio/ha (m ³ .ha ⁻¹)	654,35	453,43
Peso médio individual (t)	0,89	0,80

5.2.1.3. Sistema de colheita da madeira

O sistema de colheita da madeira estudado foi o de Árvores Inteiras (*Full tree*), onde a derrubada era realizada pelo trator florestal *Feller-buncher*, marca Caterpillar e modelo 522, com peso operacional de 30,4 t e rodados de esteiras. A extração era realizada pelo trator florestal *Skidder*, marca Caterpillar e modelo 545, com peso operacional de 18,2 t, tração 4 X 4 e rodados de pneus (pressão de 42 psi / 290 kPa) recobertos com semi-esteiras na parte dianteira, conforme ilustrado no Capítulo 1.

5.2.1.4. Camada de resíduos da colheita de madeira

A caracterização da camada de resíduo da colheita de madeira foi realizada por meio de amostragens com uma moldura de ferro quadrada com 0,25 X 0,25 m, sendo distribuída ao acaso em cinco pontos dentro da área experimental. Todos os resíduos existentes dentro da área da moldura quadrada foram coletados formando as amostras, que foram posteriormente acondicionadas em embalagens plásticas e identificadas à campo. Em laboratório as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e encaminhadas à secagem em estufa de circulação e renovação de ar com temperatura de 60 °C por 72 horas até obtenção de peso constante. Em seguida foi realizada a pesagem do material seco (massa seca), prosseguindo com cálculo da quantidade de resíduos por metro quadrado que permaneceu sobre a área após a colheita de madeira.

O valor médio de massa seca da camada resíduos avaliada na área de estudo do CHa foi de 12,39 kg.m⁻², e da área de estudo do RLh foi de 5,29 kg.m⁻².

5.2.2. Procedimento amostral

Para avaliar os efeitos de diferentes intensidades de tráfego das máquinas nas áreas selecionadas, foram comparados diversos tratamentos em função do número de passadas cumulativas das máquinas de colheita da madeira sobre o solo, sendo que o experimento e todas as coletas dos dados foram realizados em novembro de 2009.

Inicialmente, foi realizada a remoção de toda a madeira das áreas de estudo sem haver a interferência do tráfego de máquinas, prosseguindo com a distribuição de dois blocos nos quais foram instaladas parcelas amostrais, de 5 m de largura por 40 m de comprimento, para cada tratamento analisado. Nas parcelas, foram realizadas simulações da intensidade de

tráfego, nas quais as máquinas de colheita da madeira trafegaram com a mesma carga sobre a mesma trilha de passagem, sendo analisados os seguintes tratamentos:

- **ST**: sem tráfego das máquinas (Testemunha);
- **FB**: 1 passada do *Feller-buncher*;
- **FB + 1SD**: 1 passada do *Feller-buncher* + 1 passada do *Skidder*;
- **FB + 3SD**: 1 passada do *Feller-buncher* + 3 passadas do *Skidder*;
- **FB + 5SD**: 1 passada do *Feller-buncher* + 5 passadas do *Skidder*;
- **FB + 10SD**: 1 passada do *Feller-buncher* + 10 passadas do *Skidder*;
- **FB + 15SD**: 1 passada do *Feller-buncher* + 15 passadas do *Skidder*.

Em cada parcela amostral foram feitas as coletas de amostras indeformadas de solo nas faixas de tráfego das máquinas, em cinco pontos nas profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, mantendo-se condições semelhantes entre as parcelas, visando diminuir os efeitos da variabilidade do solo. A Figura 23 ilustra como foi feita distribuição das parcelas e dos pontos amostrais. Ressalta-se que na área de estudo do CHa o *Skidder* trafegou com uma carga de arraste média de 3,55 t, enquanto na área de estudo do RLh a carga de arraste média foi de 3,2 t.

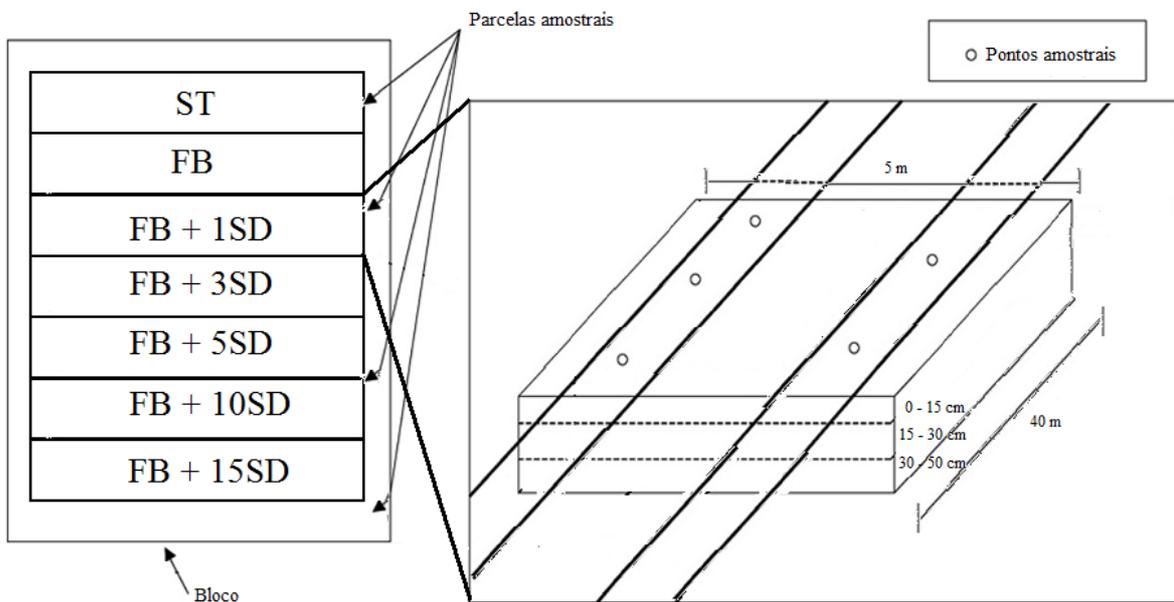


Figura 23. Desenho do esquema amostral, mostrando a distribuição das parcelas e dos pontos amostrais em cada parcela.

5.2.3. Análises físicas do solo

5.2.3.1. Densidade do solo e porosidade total

A densidade do solo (D_s) e a porosidade total (P_t) foram determinadas conforme metodologia proposta pela Embrapa (1997), sendo coletadas amostras indeformadas do solo com o uso de anéis volumétricos de 100 cm^3 .

5.2.3.2. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi medida com uso de um penetrógrafo eletrônico digital, marca *Eijkelkamp* e modelo 06.15.SA, equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm^2 (11,28 mm de diâmetro nominal), sendo as leituras feitas conforme metodologia da ASAE, citada por Balastreire (1987).

As avaliações de resistência à penetração foram realizadas nos mesmos pontos amostrais da coleta de solo, com as medições feitas em diferentes posições em relação à linha de tráfego dos rodados das máquinas, conforme esquema da Figura 24, onde:

- **RD**: Linha dos rodados;
- **ER**: Entre rodados;
- **FR25**: Fora dos rodados a 25 cm de distância;
- **FR50**: Fora dos rodados a 50 cm de distância;
- **FR75**: Fora dos rodados a 75 cm de distância;
- **FR100**: Fora dos rodados a 100 cm de distância.

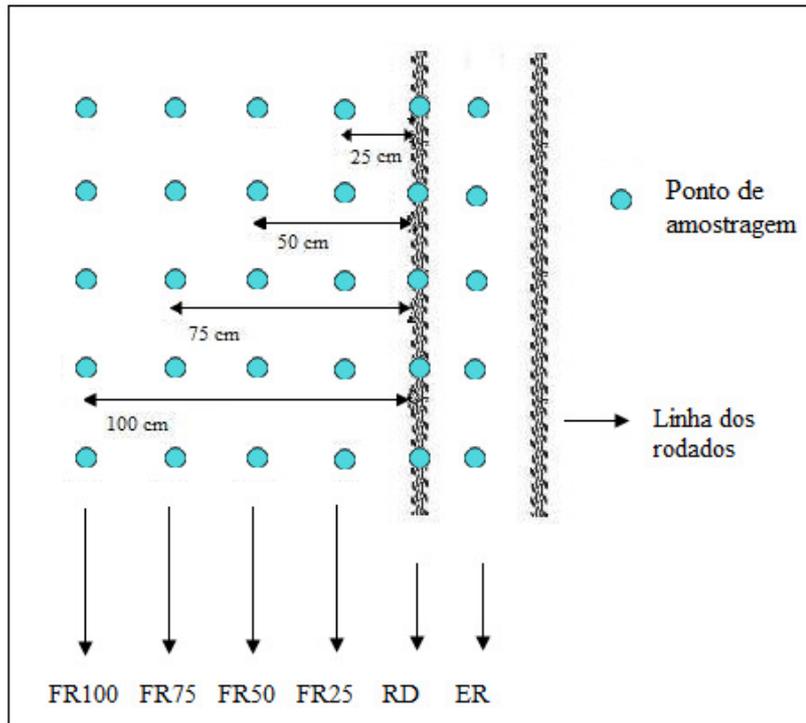


Figura 24. Desenho do esquema das medições de resistência à penetração nas posições em relação à linha de tráfego das máquinas de colheita da madeira.

5.2.4. Análises estatísticas

Neste experimento foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados. As análises da densidade do solo (Ds) e da porosidade total (Pt) foram feitas para cada profundidade avaliada (0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm), sendo que em seguida os valores foram submetidos ao teste de *Bartlett*, para verificação da homogeneidade das variâncias, procedendo-se com a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de *Tukey* a 5 % de significância.

Para a resistência à penetração (RP), a análise foi realizada a cada 10 cm até a profundidade de 80 cm para o CHa e 50 cm para o RLh. Todos os valores foram submetidos, primeiramente, ao teste de *Bartlett*, para verificação da homogeneidade das variâncias, e em seguida foi realizada a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de *Dunnnett* a 5 % de significância.

Ainda realizou-se a análise em fatorial para a resistência à penetração (RP) com os valores das diferentes posições por intensidade de tráfego, excluindo os valores ST. Essa análise teve objetivo de comparar o efeito das posições e das intensidades de tráfego, e

verificar as interações entre os fatores, sendo nesta análise as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey* a 5 %.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Densidade do solo

No CHa, a densidade do solo na condição sem tráfego (ST) aumentou de $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ na camada superficial (0 a 15 cm), para $1,01$ e $1,05 \text{ g.cm}^{-3}$ nas camadas mais profundas do solo (15 a 30 e 30 a 50 cm) (Figura 25a), enquanto no RLh, a densidade na condição sem tráfego (ST) começou em $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ na superfície (0 a 15 cm) e aumentou para $1,36$ e $1,39 \text{ g.cm}^{-3}$ nas profundidades maiores (15 a 30 e 30 a 50 cm) (Figura 25b).

O tráfego das máquinas de colheita da madeira alterou a densidade dos dois solos estudados desde a primeira passada. Como pode ser visto, no CHa, o aumento da densidade foi crescente com o aumento do número de passadas, enquanto no RLh, o aumento do número de passadas não causou aumento da densidade de forma gradativa. Isso mostra que as primeiras passadas das máquinas, neste solo, foram responsáveis por grande parte da compactação sofrida, como também verificaram Jorajuria e Draghi (2000), que relatam que 90 % do incremento máximo medido para a densidade do solo na camada superficial (0 a 30 cm) foi produzido já na primeira passada de um trator de porte leve. Neste mesmo solo, ainda é possível verificar que as maiores alterações ocorreram na camada superficial do solo. Esse fato também relatado por Froehlich *et al.* (1980), que em estudos detectaram que a compactação média a 15 cm de profundidade foi 50 % menor que a 5 cm.

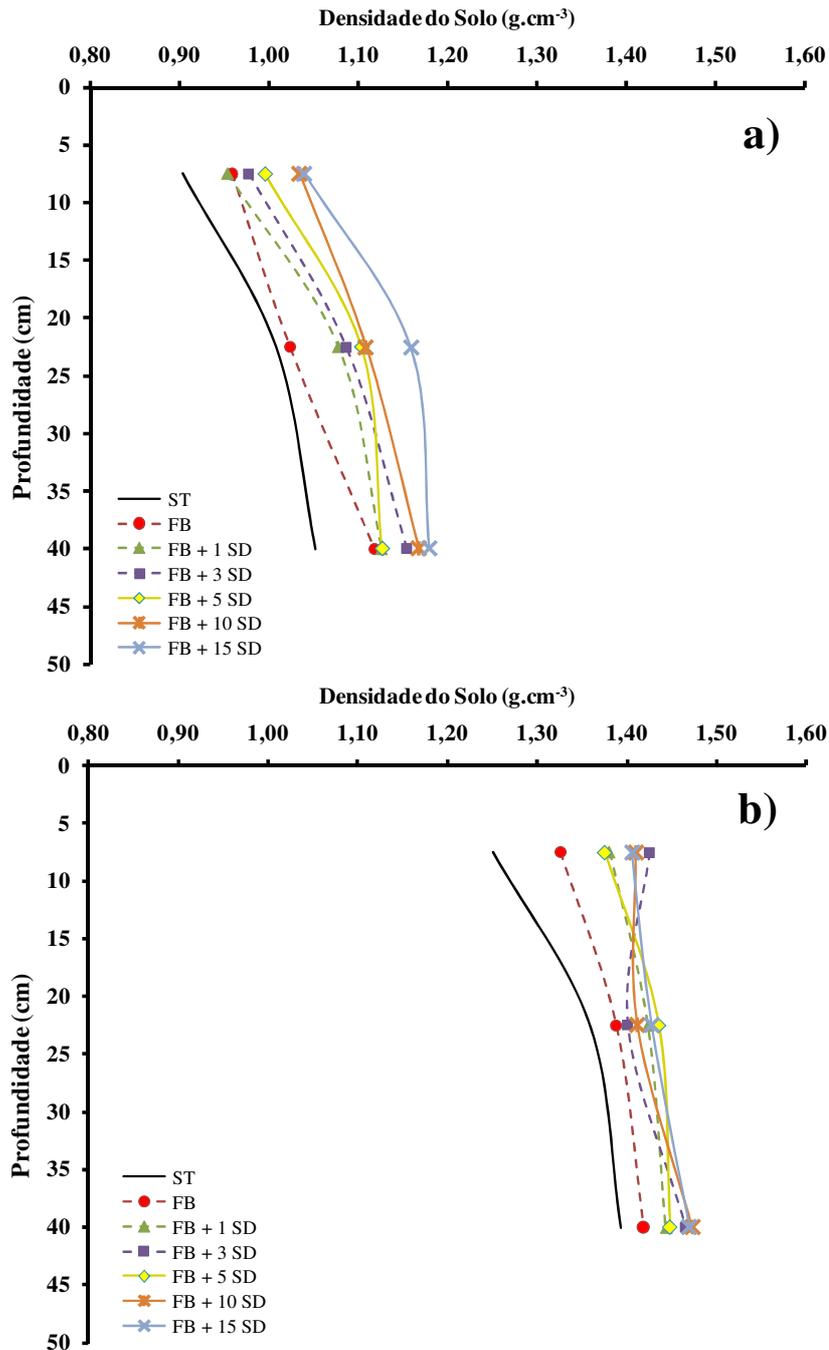


Figura 25. Valores médios de densidade do solo para as diferentes intensidades de tráfego no CHa (a) e no RRh (b)

A Tabela 19 apresenta os valores médios de densidade do solo nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos dois solos estudados. Como pode ser visto, no CHa os maiores valores de densidade do solo na profundidade de 0 a 15 cm, foram detectados nas maiores intensidades de tráfego, chegando a um aumento de 13,1 % na intensidade de tráfego FB + 15SD, em relação à condição sem tráfego (ST). Nessa profundidade, já se

observou diferença significativa em relação à condição ST, com uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder* (FB + 5SD). Na profundidade de 15 a 30 cm, a única condição que mostrou diferença significativa em relação ao local sem tráfego (ST) foi FB + 15SD, aumentando a densidade do solo em 13 %. Em relação à profundidade de 30 a 50 cm, os maiores valores de densidade do solo foram verificados nas intensidades de tráfego de FB + 10SD e FB + 15SD, com 9,9 % e 10,8 %, respectivamente. Contudo, na intensidade de tráfego após uma passada do *Feller-buncher* mais três passadas do *Skidder* (FB + 3SD), verificou-se diferença significativa em relação à condição sem tráfego (ST). Esse aumento de densidade nas camadas mais profundas também foi relatado por Lopes *et al.* (2006), que verificaram aumentos em densidade de um solo de textura argilosa na camada de 30 a 50 cm, após duas passadas de um *Track-skidder* e de um *Clambunk Skidder* durante a operação de arraste das árvores.

Neste solo (CHa), a densidade aumentou de forma gradual com as passadas das máquinas, sendo que 67 % do incremento total da densidade ocorrido após a condição de maior intensidade de tráfego (FB + 15SD), já ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder* (FB + 5SD). Fato semelhante foi relatado por Brais e Camiré (1998), que constataram em solos de textura grosseira, que 50 % do impacto total causado, ocorreu após três passadas das máquinas. Coleti e Demattê (1982) também verificaram isso, concluindo que a tendência dos valores de densidade é aumentar com a intensidade do tráfego, sendo que aproximadamente 50 a 60 % da compactação do solo se manifestou com as primeiras passadas.

No RLh, verifica-se que o maior aumento em densidade do solo na profundidade de 0 a 15 cm ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais três passadas do *Skidder* (FB + 3SD), aumentando em 12,2 % a densidade em relação à condição sem tráfego (ST). Contudo, foi possível ver que após uma passada do *Feller-buncher* (FB), já houve diferença significativa em relação ao local sem tráfego (ST). Esse fato reforça o que foi observado em muitas pesquisas, nas quais se verificam que as primeiras passadas são responsáveis por maior parte da compactação, e que em muitos casos as maiores alterações são promovidas em maior magnitude na camada mais superficial do solo. Na profundidade seguinte (15 a 30 cm), percebe-se que os efeitos foram menores e a única diferença significativa em relação à condição ST, ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder* (FB + 5SD), aumentando a densidade em 5,3 %. Na camada de 30 a 50 cm de profundidade

diferenças significativas foram observadas a partir da condição FB + 3SD, sendo que o maior aumento em densidade ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais dez passadas do *Skidder* (FB + 10SD), com 5,4 %.

Comparando os aumentos de densidade neste solo (RLh) entre as profundidades, percebe-se que o incremento máximo nas camadas mais profundas (15 a 30 e 30 a 50 cm) foi em média 56 % menor do que na camada superficial (0 a 15 cm). Esse resultado mostra, mais uma vez, que essa camada apresentou maior susceptibilidade às alterações promovidas pelo tráfego das máquinas. Outro fato observado foi que 83 % do aumento total da densidade sofrida após a maior intensidade de tráfego, já ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais uma passada do *Skidder* (FB + 1SD), indicando que as primeiras passadas foram, de fato, as que causaram maior parte da compactação em termos de densidade neste solo.

É importante ressaltar que, em nenhuma das intensidades de tráfego nos dois solos estudados, se detectaram aumentos na densidade do solo acima de 15 %, sendo este o limite que pode restringir o crescimento radicular das plantas, conforme sugerido por Geist *et al.* (1989). Por outro lado, observando os valores de D_{sc} IHO e D_{sc} Rest, percebe-se que no CHa estes limites ainda se encontram distantes, enquanto que no RLh, nas camadas superficiais (intervalo de 0 a 30 cm) esses limites estão próximos, e na camada mais profunda (30 a 50 cm), a densidade considerada crítica (D_{sc} IHO) já foi ultrapassada. Por isso, neste solo deve-se atentar em relação às condições de tráfego que serão submetidos no futuro, para que não venham a serem atingidos os valores de densidade restritiva (D_{sc} Rest), que potencialmente poderão prejudicar o desenvolvimento de plantas.

De forma geral, é importante se alertar sobre aumentos na densidade dos solos, pois conforme citam Oliveira *et al.* (2001), o movimento de água nos solos está diretamente relacionado com a porosidade de drenagem e, dependendo do tipo de solo, um pequeno aumento da densidade, causado pela compactação, pode diminuir a taxa de infiltração em até 80 %. Por isso, medidas de controle de tráfego são importantes, pois embora não seja possível eliminar os efeitos da compactação, existem alternativas para minimizá-los, como a concentração do tráfego em carreadores pré-determinados.

Tabela 19. Valores médios de densidade do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos solos avaliados.

Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)										
Profundidades (cm)	Valor F	Intensidades de Tráfego							Ds _c IHO	Ds _c Rest
		ST	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD		
g.cm⁻³										
0 — 15	5,19**	0,90 b (\pm 0,04)	0,96 ab (\pm 0,03)	0,95 ab (\pm 0,04)	0,98 ab (\pm 0,10)	1,00 a (\pm 0,08)	1,03 a (\pm 0,08)	1,04 a (\pm 0,02)	1,63	1,71
15 — 30	6,56**	1,01 c (\pm 0,07)	1,02 bc (\pm 0,04)	1,08 abc (\pm 0,06)	1,09 abc (\pm 0,10)	1,10 ab (\pm 0,05)	1,11 ab (\pm 0,06)	1,16 a (\pm 0,04)	1,64	1,71
30 — 50	4,96**	1,05 b (\pm 0,07)	1,12 ab (\pm 0,07)	1,13 ab (\pm 0,02)	1,16 a (\pm 0,09)	1,13 ab (\pm 0,05)	1,17 a (\pm 0,05)	1,18 a (\pm 0,05)	1,58	1,65
Neossolo Litólico Húmico típico (RLh)										
Profundidades (cm)	Valor F	Intensidades de Tráfego							Ds _c IHO	Ds _c Rest
		ST	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD		
g.cm⁻³										
0 — 15	13,28**	1,25 c (\pm 0,04)	1,33 b (\pm 0,04)	1,38 ab (\pm 0,03)	1,42 a (\pm 0,02)	1,38 ab (\pm 0,11)	1,41 a (\pm 0,03)	1,41 a (\pm 0,02)	1,48	1,56
15 — 30	2,75*	1,36 b (\pm 0,05)	1,39 ab (\pm 0,02)	1,42 ab (\pm 0,03)	1,40 ab (\pm 0,03)	1,44 a (\pm 0,09)	1,41 ab (\pm 0,06)	1,43 ab (\pm 0,03)	1,48	1,56
30 — 50	5,50**	1,39 c (\pm 0,04)	1,42 bc (\pm 0,03)	1,44 abc (\pm 0,05)	1,47 ab (\pm 0,04)	1,45 ab (\pm 0,04)	1,47 a (\pm 0,06)	1,47 ab (\pm 0,04)	1,45	1,52

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo; Ds_c IHO: densidade do solo crítica e Ds_c Rest: densidade do solo restritiva de acordo com equações propostas por Reinert *et al.* (2006).

5.3.2. Porosidade total

A porosidade total nos solos estudados decresceu com o aumento da profundidade (Figura 26), isto pode ter sido devido ao menor acúmulo de matéria orgânica, menor presença de raízes e bioporos nas camadas mais profundas do solo. Esse atributo também apresentou sensibilidade às alterações provocadas pelo tráfego das máquinas de colheita da madeira. Mantovani (1987) enfatiza que a porosidade que representa o parâmetro mais significativo para ser utilizado na discussão da compactação, em função da descrição direta da proporção de volume do solo disponível para as raízes das plantas, da água e do ar que elas requerem.

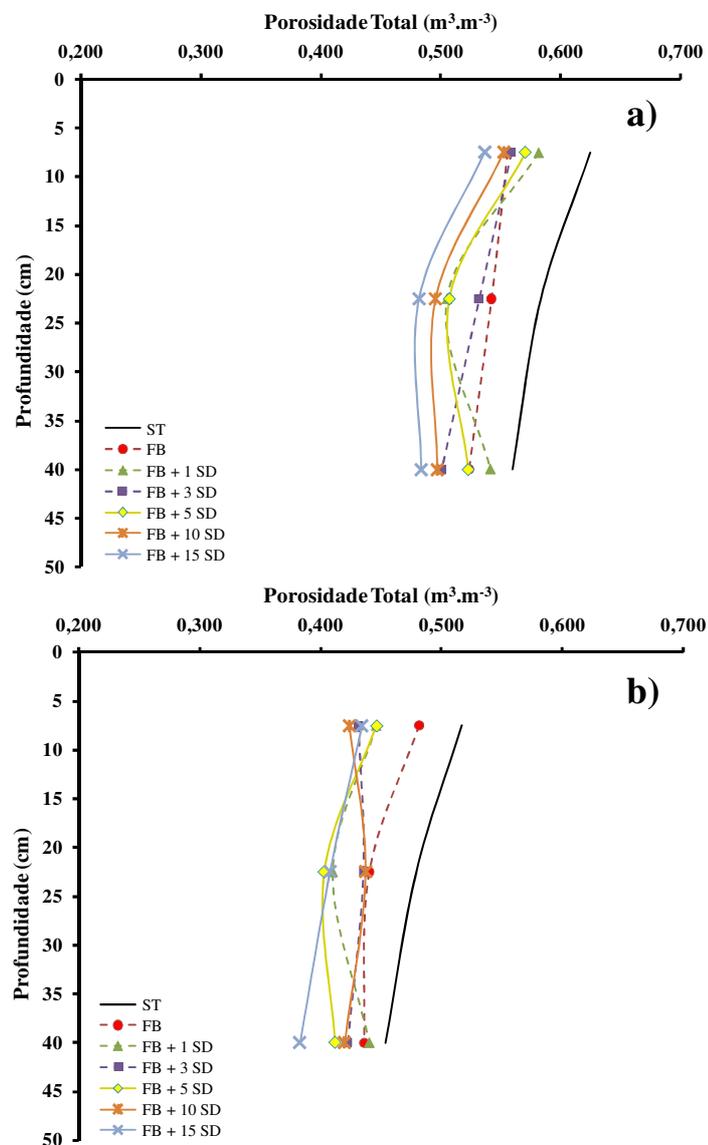


Figura 26. Valores médios de porosidade total do solo para as diferentes intensidades de tráfego no CHa (a) e no RRh (b).

Como pode ser visto, nas primeiras passadas das máquinas, já ocorreram reduções da porosidade dos solos. Essa redução ocorreu, pois, quando as máquinas trafegam sobre o solo, uma alteração imediata na porosidade é induzida, devido, principalmente, a uma redução no volume de macroporos. No CHa essas reduções foram crescentes com o aumento da intensidade de tráfego, enquanto no RLh, as primeiras passadas ocasionaram maior parte das reduções, sendo detectadas em todas as camadas de solo.

Analisando os resultados da Tabela 20, é possível notar que no CHa as maiores reduções da porosidade total foram verificadas na maior condição de intensidade de tráfego (FB + 15SD), com reduções de 14,1, 17,4 e 13,6 % nas camadas de profundidade de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, respectivamente. Foi somente nesta condição que se detectaram diferenças significativas em relação à condição sem tráfego (ST), apesar de serem visíveis as alterações nas outras nas condições de intensidade de tráfego.

Em relação ao RLh, na profundidade de 0 a 15 cm a maior redução da porosidade total foi verificada após uma passada do *Feller-buncher* mais dez passadas do *Skidder* (FB + 10SD), com 18,1 % de redução. Porém, nota-se que o efeito do tráfego das máquinas sobre o solo nesta camada, já apresentou diferenças significativas após uma passada do *Feller-buncher* mais uma passada do *Skidder* (FB + 1SD). Na profundidade de 15 a 30 cm ocorreu a maior redução de porosidade total na condição FB + 5SD, com 15,9 %. Já na última camada de solo (30 a 50 cm) a maior intensidade de tráfego (FB + 15SD) foi a responsável pela maior alteração da porosidade, reduzindo esse atributo em 15,6 %.

Em geral, a redução da porosidade total pelas intensidades de tráfego impostas foi decrescente de acordo com o aumento da profundidade do solo. Entretanto, salienta-se que a compactação na camada superficial é determinada pela pressão sobre o solo, e a compactação do subsolo é diretamente influenciada pela carga total imposta, sendo independente da pressão exercida sobre a superfície do solo (HAKANSSON *et al.*, 1988; SMITH e DICKSON, 1992).

Tabela 20. Valores médios de porosidade total do solo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos solos avaliados.

Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)								
Profundidades (cm)	Valor F	Intensidades de Tráfego						
		ST	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD
$m^3.m^{-3}$								
0 ─ 15	2,46*	0,625 a ($\pm 0,020$)	0,555 ab ($\pm 0,042$)	0,582 ab ($\pm 0,039$)	0,558 ab ($\pm 0,068$)	0,570 ab ($\pm 0,065$)	0,551 ab ($\pm 0,087$)	0,537 b ($\pm 0,043$)
15 ─ 30	2,83*	0,584 a ($\pm 0,051$)	0,543 ab ($\pm 0,048$)	0,505 ab ($\pm 0,065$)	0,531 ab ($\pm 0,069$)	0,507 ab ($\pm 0,076$)	0,496 ab ($\pm 0,073$)	0,482 b ($\pm 0,051$)
30 ─ 50	3,11*	0,561 a ($\pm 0,039$)	0,524 ab ($\pm 0,052$)	0,542 ab ($\pm 0,048$)	0,501 ab ($\pm 0,048$)	0,523 ab ($\pm 0,045$)	0,497 ab ($\pm 0,040$)	0,485 b ($\pm 0,060$)
Neossolo Litólico Húmico típico (RLh)								
Profundidades (cm)	Valor F	Intensidades de Tráfego						
		ST	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD
$m^3.m^{-3}$								
0 ─ 15	12,38**	0,517 a ($\pm 0,028$)	0,482 ab ($\pm 0,016$)	0,446 bc ($\pm 0,027$)	0,432 c ($\pm 0,027$)	0,447 bc ($\pm 0,042$)	0,424 c ($\pm 0,026$)	0,434 c ($\pm 0,022$)
15 ─ 30	7,69**	0,479 a ($\pm 0,016$)	0,440 ab ($\pm 0,020$)	0,410 b ($\pm 0,042$)	0,436 b ($\pm 0,021$)	0,403 b ($\pm 0,045$)	0,437 b ($\pm 0,030$)	0,408 b ($\pm 0,015$)
30 ─ 50	5,68**	0,454 a ($\pm 0,029$)	0,436 ab ($\pm 0,024$)	0,440 ab ($\pm 0,029$)	0,423 abc ($\pm 0,021$)	0,412 bc ($\pm 0,039$)	0,420 abc ($\pm 0,036$)	0,382 c ($\pm 0,033$)

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %; *significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo.

5.3.3. Resistência do solo à penetração

5.3.3.1. Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)

A Figura 27 mostra a resistência do solo à penetração nas diferentes intensidades de tráfego e posições. Como pode ser visto, a resistência à penetração no local sem tráfego das máquinas (ST), aumentou de 0,57 MPa na superfície (0 a 10 cm) para 1,81 MPa a 80 cm de profundidade.

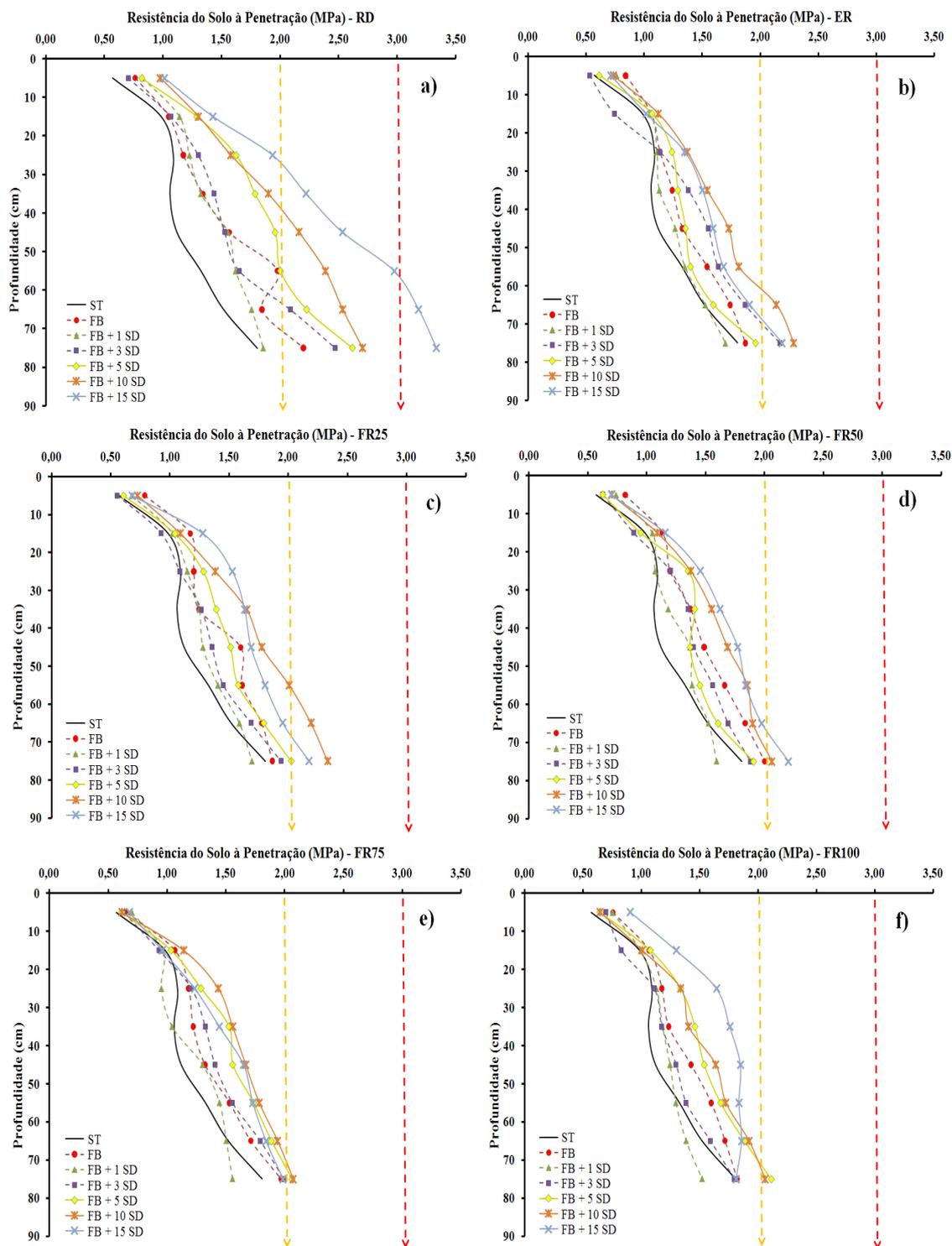


Figura 27. Valores médios de resistência à penetração para as posições e intensidades de tráfego no CHa. **a)** Linha dos rodados (RD); **b)** Entre rodados (ER); **c)** Fora dos rodados a 25 cm de distância (FR25); **d)** Fora dos rodados a 50 cm de distância (FR50); **e)** Fora dos rodados a 75 cm (FR75); **f)** Fora dos rodados a 100 cm (FR100); Setas laranja indicam valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a); Setas vermelha indicam valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU *et al.*; 2000).

É possível notar que os valores de resistência do solo à penetração são maiores na posição linha dos rodados (RD) (Figura 27a) em comparação às demais posições. Nesta posição percebe-se que o aumento da intensidade de tráfego resultou em um aumento acentuado da resistência à penetração, tendo efeitos até a última profundidade estudada. O efeito da compactação nas profundidades subsuperficiais do solo ocorre em função da carga total por eixo, já o efeito da compactação nas camadas superficiais do solo, ocorre em função da pressão de inflagem dos pneus (SALIRE, HAMMEN e HARDCASTLE, 1994; HAKANSSON e VOORHEES, 1997). Ainda é importante destacar que os reflexos do aumento do número de passadas das máquinas também foram vistos nas outras posições, porém em menor escala, mostrando que a compactação afeta o solo mais em profundidade do que lateralmente.

Na posição referente à linha dos rodados (RD) (Tabela 21 e Figura 27a), os maiores aumentos em resistência à penetração causados pelo tráfego das máquinas, ocorreram no intervalo de profundidade entre 30 a 70 cm, ou seja, não foram verificados os maiores aumentos nas camadas superficiais, podendo isso ser explicado devido às perdas de solo e à formação de sulcos na superfície ocasionadas pela tração exercida pelos rodados das máquinas, resultando em maiores alterações nesse intervalo de solo.

Nessa posição (RD), em todas as profundidades estudadas, o maior aumento da resistência do solo à penetração foi observada após uma passada do *Feller-buncher* mais quinze passadas do *Skidder* (FB + 15SD), com incremento em média de 47,6 % na resistência à penetração. Porém, é importante destacar que foram constatadas diferenças significativas em relação à condição sem tráfego (ST), a partir de uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder* (FB + 5SD), cuja intensidade de tráfego compactou em média 70,3 % da compactação total ocorrida após a condição de maior intensidade de tráfego (FB + 15SD).

Valores acima de 2 MPa também foram verificados nessa posição em quase todas as intensidades de tráfego, exceto após uma passada do *Feller-buncher* mais uma passada do *Skidder* (FB + 1SD). Esse valor limite no qual o crescimento radicular começa a ser restringido (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a), é atingido em maior magnitude no perfil de solo, conforme aumentou o número de passagens das máquinas, chegando a ultrapassar 3 MPa após uma passada do *Feller-buncher* mais quinze passadas do *Skidder* (FB + 15SD), que é considerado o limite para o desenvolvimento de espécies florestais (RP restritiva) (ZOU *et al.*, 2000).

A resistência à penetração na posição entre rodados (ER) (Figura 27b) apresentou uma certa heterogeneidade nas camadas superficiais do solo em relação às condições de tráfego submetidas. Na profundidade de 0 a 10 cm, a condição de tráfego após uma passada do *Feller-buncher* (FB) foi a única condição de tráfego que causou diferença significativa em comparação ao local sem tráfego (ST) (Tabela 21). Na profundidade de 10 a 20 cm não foi constatado aumento significativa da resistência à penetração em comparação com a condição ST. No restante do perfil de solo, intervalo entre 20 e 80 cm de profundidade, os maiores aumentos ocorreram após uma passada do *Feller-buncher* mais 10 passadas do *Skidder* (FB + 10SD), aumentando a resistência do solo à penetração em média 27,4 %. Esta ocorrência mostra que altas intensidades de tráfego causam alterações também na posição entre rodados, indicando que a compactação não se restringe somente na linha de tráfego das máquinas. Ampoorter *et al.* (2007) em estudo com um sistema de colheita formado por um *Harvester* e um *Forwarder*, constataram acréscimos em resistência à penetração em solos arenosos mesmo na posição entre rodados das máquinas, porém, com os valores menores relação à posição linha dos rodados, como observado nas condições deste solo.

Efeitos semelhantes à posição entre rodados (ER) ocorreram nas demais posições fora dos rodados, como pode ser visto nas Figuras 27c a 27f. À medida que se afastou da linha dos rodados, houve uma redução dos efeitos do tráfego das máquinas de colheita da madeira.

De forma geral, nessas posições, nas camadas mais superficiais não houve diferenças significativas das condições de tráfego submetidas em relação à condição sem tráfego (ST). No intervalo entre 20 a 60 cm de profundidade foram constatadas as maiores diferenças em relação ao local sem tráfego (ST), sendo as intensidades de tráfego mais acentuadas as responsáveis por tais diferenças. Esse resultado demonstra que foi nessa faixa de profundidade, onde este solo se encontrou mais susceptível às alterações promovidas pelo tráfego das máquinas. Nas camadas mais profundas de solo, geralmente, não foram constatadas diferenças significativas entre as condições de tráfego.

Em todas as posições avaliadas, as diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita submetidas aumentaram a resistência do solo à penetração, quando comparando à condição sem tráfego (ST). Entretanto, esse aumento teve intensidade mais acentuada na posição de linha dos rodados (RD) como esperado, diminuindo conforme se distanciou dessa posição. De acordo com Gill *et al* (1968), as pressões aplicadas sobre a superfície do solo são

distribuídas ao longo do perfil, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, de acordo com as características físicas do solo.

Outro fato observado, foi o aumento da resistência à penetração logo nas primeiras passadas das máquinas, entrando em acordo com Nugent *et al.* (2003), que citam que as passadas iniciais, durante o tráfego de máquinas, são as responsáveis pelo maior incremento da compactação do solo, em relação às passadas seguintes.

Com os resultados obtidos, ficou evidente de que a atividade de arraste das árvores é responsável pela maior compactação do solo, sendo que após várias passadas esse efeito se agrava, causando alterações significativas até as camadas mais profundas, bem como lateralmente no perfil de solo. Por isso, é necessária a adoção do controle do tráfego das operações de colheita da madeira, concentrando o tráfego, a fim de minimizar os efeitos negativos sobre toda a área e sobre o crescimento do povoamento das rotações futuras.

Tabela 21. Valores médios de resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de tráfego, posições e profundidades no Cambissolo Húmico Alumínico típico (Cha).

Tratamentos	Posição	Profundidade (cm)							
		0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70	70 – 80
Testemunha (ST)		0,57	0,98	1,09	1,06	1,12	1,32	1,52	1,81
	RD	0,76	1,05	1,17	1,34	1,56	1,98	1,85	2,20
FB	ER	0,84 ≠	1,06	1,13	1,24	1,33	1,54	1,74	1,87
	FR 25	0,79	1,17	1,20	1,25	1,60	1,61	1,77	1,86
	FR 50	0,82	1,13	1,20	1,37	1,49	1,66	1,84	2,00
	FR 75	0,66	1,07	1,18	1,22	1,32	1,53	1,71	1,97
	FR 100	0,76	1,07	1,17	1,23	1,42	1,60	1,72	1,82
	RD	0,83	1,14	1,23	1,32	1,55	1,62	1,76	1,85
FB + 1SD	ER	0,76	1,05	1,11	1,13	1,27	1,35	1,53	1,70
	FR 25	0,68	1,02	1,15	1,25	1,28	1,41	1,59	1,69
	FR 50	0,74	1,05	1,07	1,18	1,37	1,39	1,52	1,59
	FR 75	0,70	0,97	0,95	1,04	1,30	1,45	1,50	1,56
	FR 100	0,75	0,99	1,13	1,18	1,24	1,29	1,38	1,52
	RD	0,70	1,07	1,30	1,44	1,53	1,65	2,09	2,47
FB + 3SD	ER	0,53	0,74	1,14	1,38 ≠	1,55 ≠	1,64	1,87	2,17
	FR 25	0,56	0,93	1,08	1,27	1,36	1,45	1,69	1,94
	FR 50	0,63	0,89	1,20	1,35	1,40	1,56	1,69	1,88
	FR 75	0,63	0,93	1,21	1,32	1,41	1,56	1,79	1,99
	FR 100	0,70	0,83	1,11	1,17	1,30	1,38	1,59	1,80
	RD	0,82	1,29 ≠	1,63 ≠	1,79 ≠	1,96 ≠	2,00 ≠	2,23 ≠	2,62 ≠
FB + 5SD	ER	0,61	1,07	1,24	1,29	1,36	1,40	1,60	1,96
	FR 25	0,61	1,04	1,28	1,39 ≠	1,51	1,58	1,79	2,02
	FR 50	0,63	0,95	1,35	1,41 ≠	1,37	1,45	1,61	1,91
	FR 75	0,62	1,04	1,29	1,53 ≠	1,56	1,74	1,89	2,06
	FR 100	0,65	1,08	1,34	1,46 ≠	1,54	1,68	1,88	2,11
	RD	0,98 ≠	1,30 ≠	1,58 ≠	1,90 ≠	2,16 ≠	2,39 ≠	2,54 ≠	2,71 ≠
FB + 10SD	ER	0,73	1,12	1,37 ≠	1,54 ≠	1,73 ≠	1,81 ≠	2,14 ≠	2,29
	FR 25	0,73	1,09	1,38 ≠	1,65 ≠	1,78 ≠	2,01 ≠	2,19 ≠	2,33
	FR 50	0,70	1,09	1,37 ≠	1,55 ≠	1,69 ≠	1,85 ≠	1,90	2,06
	FR 75	0,61	1,14	1,44 ≠	1,56 ≠	1,67 ≠	1,78	1,94	2,07
	FR 100	0,65	1,01	1,34	1,41	1,64 ≠	1,72	1,92	2,06
	RD	1,01 ≠	1,43 ≠	1,94 ≠	2,22 ≠	2,53 ≠	2,97 ≠	3,18 ≠	3,34 ≠
FB + 15SD	ER	0,71	1,02	1,35 ≠	1,50 ≠	1,59 ≠	1,68	1,91	2,19
	FR 25	0,68	1,28 ≠	1,53 ≠	1,63 ≠	1,68 ≠	1,81 ≠	1,95	2,18
	FR 50	0,70	1,16	1,46 ≠	1,62 ≠	1,77 ≠	1,84 ≠	1,97	2,20
	FR 75	0,68	0,96	1,24	1,44 ≠	1,65 ≠	1,73	1,84	1,99
	FR 100	0,91 ≠	1,30 ≠	1,64 ≠	1,76 ≠	1,85 ≠	1,84 ≠	1,86	1,81
	RD	1,01 ≠	1,43 ≠	1,94 ≠	2,22 ≠	2,53 ≠	2,97 ≠	3,18 ≠	3,34 ≠
Valor F		2,73**	4,94**	6,65**	8,35**	6,16**	6,38**	5,81**	3,45**

Médias seguidas de ≠ na coluna diferem estatisticamente da Testemunha (ST) pelo teste de *Dunnnett* a 5 %; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; RD: linha do rodado; ER: entre rodado; FR 25: fora do rodado a 25 cm de distância; FR 50: fora do rodado a 50 cm; FR 75: fora do rodado a 75 cm; FR 100: fora do rodado a 100 cm.

A Tabela 22 apresenta a análise de variância em fatorial entre as intensidades de tráfego e posições, excluindo os valores ST. Esta análise indicou haver diferenças entre as intensidades de tráfego, entre as posições e entre as profundidades do solo, havendo interação significativa entre a intensidade de tráfego e a posição; entre a intensidade de tráfego e a profundidade; e entre a posição e a profundidade.

Diferenças entre as intensidades de tráfego já eram esperadas, como visto anteriormente. Observando a Tabela 23, verifica-se que as maiores intensidades de tráfego (FB + 10SD e FB + 15SD) não diferiram entre si, porém, apresentando diferenças em relação às demais condições de tráfego. Isso indica que em todas as posições estudadas, após uma passada do *Feller-buncher* mais dez passadas do *Skidder* (FB + 10SD), não há mais efeitos significativos no aumento da resistência do solo à penetração. O menor aumento na resistência à penetração foi verificado na condição FB + 1SD, mostrando que essa condição alterou menos o solo do que a condição de tráfego FB. De acordo com Soane (1980), para um determinado número de passadas de máquinas, é esperado que a segunda passada provoque menor compactação do que a primeira passada, como se verificou nas condições submetidas a este solo. No entanto, o autor salienta que a resposta do solo para uma certa intensidade de tráfego, está relacionada com o nível inicial de compactação e da distribuição em camadas mais profundas do solo.

Outra diferença esperada foi na posição linha dos rodados (RD) em relação às outras posições (ER, FR25, FR50, FR75, FR100), sendo que estas últimas não diferiram estatisticamente entre si. Todavia, é possível notar que houve um ligeiro decréscimo dos valores médios de resistência à penetração, conforme aumentou a distância em relação à linha dos rodados, mostrando mais uma vez que os efeitos diminuem lateralmente no solo.

A interação entre a intensidade de tráfego e a posição foi significativa, pois, com o aumento do número de passadas das máquinas, a resistência à penetração na linha dos rodados (RD) aumentou distintamente, porém, para as posições entre rodados e fora dos rodados, essa distinção acentuada não foi verificada, assim detectou-se essa diferença entre a posição RD com as outras posições.

O fato da interação entre a intensidade de tráfego e a profundidade ser significativa, foi devido a resistência à penetração aumentar de acordo com a intensificação do tráfego das máquinas, havendo diferenças evidentes nos valores entre as profundidades conforme o número de passadas das máquinas. O mesmo pode ser aplicado em relação à interação entre a

posição e a profundidade, onde foi possível perceber que na linha dos rodados (RD) os valores foram visivelmente maiores do que nas outras posições, diferenciando-se entre as camadas de profundidade do solo.

Tabela 22. Análise de variância em fatorial da resistência do solo à penetração no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Fator de Variação	Resistência do Solo à Penetração	
	G.L.	Valor F
Intensidade de Tráfego	5	78,58**
Posição	5	61,50**
Profundidade	7	417,83**
Blocos	1	0,56 ns
Intensidade de Tráfego X Posição	25	6,33**
Intensidade de Tráfego X Profundidade	35	3,30**
Posição X Profundidade	35	2,00**

*significativo a 5 %; **significativo a 1 %; ns não significativo.

Tabela 23. Valores médios de resistência do solo à penetração por intensidade de tráfego e posição no Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Posição	Intensidade de Tráfego						MÉDIA
	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD	
	MPa						
RD	1,49 cA	1,41 cA	1,53 cA	1,79 bA	1,94 bA	2,33 aA	1,75
ER	1,34 bcA	1,24cAB	1,38 bcAB	1,32 bcB	1,59 aB	1,49 abB	1,39
FR25	1,41 bA	1,26 bAB	1,28 bB	1,40 bB	1,64 aB	1,59 aB	1,43
FR50	1,44 abA	1,24 cAB	1,32 bcB	1,33 bcB	1,53 aB	1,59 aB	1,41
FR75	1,33 bcA	1,18 cB	1,36 abcAB	1,46 abB	1,53 aB	1,44 abB	1,38
FR100	1,35 bcA	1,19 cB	1,23 abB	1,47 abB	1,47 abB	1,62 aB	1,33
MÉDIA	1,39	1,25	1,35	1,46	1,62	1,68	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

5.3.3.2. Neossolo Litólico Húmico típico (RLh)

Pela Figura 28, pode-se notar que na posição linha dos rodados (RD) se encontraram os maiores aumentos em resistência à penetração nas diferentes intensidades de tráfego das máquinas de colheita da madeira. Vale lembrar que, neste solo, as determinações de resistência à penetração foram feitas até a profundidade de 50 cm, pois abaixo dessa profundidade houve contato lítico.

A condição sem tráfego (ST) apresentou um valor de resistência à penetração de 0,79 MPa na camada superficial, chegando a 2,26 MPa na camada mais profunda. Este valor se encontra acima do considerado restritivo ao crescimento radicular, porém, isso foi decorrência do baixo teor de umidade e das características deste solo.

O maior aumento em resistência à penetração na camada de 0 a 10 cm para a posição linha dos rodados (RD) (Figura 28a e Tabela 24) ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais quinze passadas do *Skidder* (FB + 15SD), no entanto, diferença significativa em relação à condição ST, já ocorreu na condição FB + 1SD. Na profundidade de 10 a 20 cm, o maior incremento de resistência foi na condição FB + 10SD, havendo diferença a partir de uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder* (FB + 5SD). Já na profundidade seguinte (20 a 30 cm), a única condição que resultou em diferença em relação ao local sem tráfego (ST), foi FB + 15SD. Nas profundidades posteriores não houve significância entre as diferenças dos valores das intensidades de tráfego, podendo isto ser devido à alta variabilidade do solo e fatores que podem ter afetado as medições à campo. Estes resultados se assemelham aos obtidos por Balbuena *et al.* (2000), que relatam que os maiores aumentos em resistência à penetração foram nas camadas até 40 cm de profundidade de um solo de textura média, havendo incrementos com o acréscimo do número de passadas de um trator.

Em média nessa posição (RD), entre todas as profundidades, a condição FB + 10SD apresentou o maior aumento da resistência à penetração, com 24,8 %. Contudo, se percebe que quanto mais próximo da superfície do solo, menos passadas das máquinas são necessárias para causar diferenças significativas em relação à condição sem tráfego (ST), e também maior será o aumento da resistência à penetração.

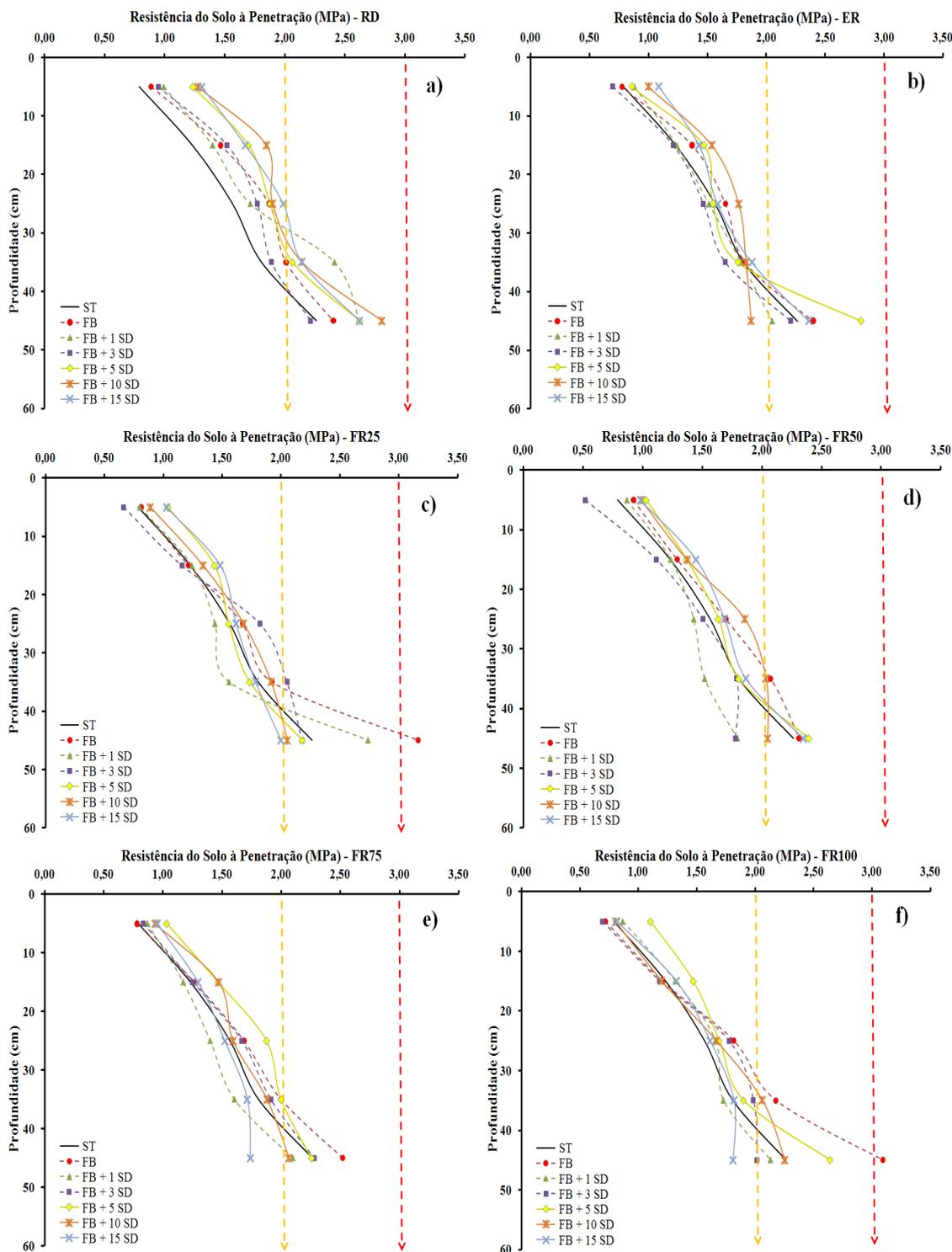


Figura 28. Valores médios de resistência à penetração para as posições e intensidades de tráfego no RLh. **a)** Linha dos rodados (RD); **b)** Entre rodados (ER); **c)** Fora dos rodados a 25 cm de distância (FR25); **d)** Fora dos rodados a 50 cm (FR50); **e)** Fora dos rodados a 75 cm (FR75); **f)** Fora dos rodados a 100 cm (FR100); Setas laranja indicam valor de resistência à penetração crítica (RP crítica) (GREACEN e SANDS, 1980; WHALEY *et al.*, 1995; TORMENA *et al.*, 1998a); Setas vermelha indicam valor de resistência à penetração restritiva (RP restritiva) (ZOU *et al.*; 2000).

Além disso, pode ser verificado nessa posição valores acima de 2 MPa em todas as condições de tráfego estabelecidas, e que 68 % do aumento total da resistência à penetração ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais uma passada do *Skidder* (FB + 1SD). Este fato sugere a necessidade de precaução em relação às condições de tráfego das máquinas neste solo, para que os efeitos nocivos do tráfego das máquinas de colheita da madeira não causem alterações que possam ser consideradas preocupantes.

Na posição entre rodados (ER) (Figura 28b) os valores de resistência à penetração são bem menores em comparação com aos obtidos na posição RD. Na primeira camada de solo (0 a 10 cm), somente após uma passada do *Feller-buncher* mais quinze passadas do *Skidder* (FB + 15SD) houve diferença significativa com condição sem tráfego (ST) (Tabela 24). Já na camada de 10 a 20 cm não foram detectadas diferenças entre as condições de tráfego e a sem tráfego (ST). Na profundidade de 20 a 30 cm somente houve diferença significativa com o local sem tráfego (ST), após uma passada do *Feller-buncher* mais dez passadas do *Skidder* (FB + 10SD). Nas demais profundidades (30 a 40 e 40 a 50 cm) não foram constatadas diferenças.

Nessa posição, em média, o maior aumento da resistência ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* mais quinze passadas do *Skidder* (FB + 15SD), com 10,2 %, ou seja, menos da metade em relação ao constatado na posição RD.

Esse comportamento da posição ER também foi observado de maneira semelhante nas posições fora dos rodados (Figura 28c a Figura 28f). De modo geral, nessas posições as diferenças entre as condições de tráfego e sem tráfego (ST) ocorreram somente nas camadas de 0 a 30 cm, sugerindo maior susceptibilidade do solo nesse intervalo de profundidade, mesmo com o afastamento das posições em relação à linha dos rodados. Para as profundidades maiores (30 a 50 cm), em geral, não foram verificadas diferenças significativas entre as condições de tráfego impostas.

De um modo geral, na posição RD os acréscimos em resistência à penetração foram bem maiores se comparados às demais posições, podendo verificar uma distinção entre os valores conforme aumentou o número de passadas das máquinas de colheita de madeira. Este fato foi observado por Oliveira Júnior *et al.* (2004), que destacam que durante as operações florestais de colheita da madeira, a compactação inicia-se com o impacto das árvores por ocasião de sua queda, tendo continuidade nas atividades subsequentes, principalmente na etapa de arraste.

Nas demais posições, não houve distinções acentuadas entre as condições de tráfego submetidas, mas percebe-se que houve aumento da resistência à penetração em relação à condição sem tráfego (ST). Entretanto, esse aumento verificado é menor do que na posição RD, assim, pode-se dizer o solo próximo à linha de passagens das máquinas de colheita foi levemente compactado. Segundo Wronski (1984), essa compactação pode ser atribuída ao movimento lateral do solo abaixo da zona de compressão máxima. Além dessa força vertical, associado ao peso da máquina, também é exercida uma pressão horizontal no solo, a qual é ocasionada pelas passadas dos rodados das máquinas.

Além disso, verifica-se que nas primeiras profundidades avaliadas se encontraram os maiores aumentos em resistência à penetração, sugerindo que a compactação afetou de forma mais significativa as camadas mais superficiais deste solo, do mesmo como foi visto para a densidade e a porosidade total.

Tabela 24. Valores médios de resistência do solo à penetração nas diferentes intensidades de tráfego, posições e profundidades no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).

Tratamentos	Posição	Profundidade (cm)				
		0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Testemunha (ST)		0,79	1,23	1,57	1,81	2,26
FB	RD	0,89	1,47	1,87	2,01	2,40
	ER	0,78	1,37	1,65	1,82	2,40
	FR 25	0,81	1,22	1,67	1,92	3,16
	FR 50	0,92	1,29	1,70	2,07	2,31
	FR 75	0,78	1,26	1,68	2,00	2,52
	FR 100	0,72	1,20	1,82	2,18	3,09 ≠
FB + 1SD	RD	0,99	1,40	1,71	2,41	2,62
	ER	0,88	1,24	1,51	1,79	2,05
	FR 25	0,80	1,24	1,44	1,56	2,74
	FR 50	0,87	1,24	1,43	1,52	1,79
	FR 75	0,87	1,17	1,40	1,60	2,10
	FR 100	0,87	1,32	1,66	1,73	2,13
FB + 3SD	RD	0,95	1,52	1,77	1,89	2,22
	ER	0,70	1,21	1,47	1,65	2,21
	FR 25	0,66	1,16	1,82 ≠	2,05	2,18
	FR 50	0,52	1,12	1,51	1,79	1,78
	FR 75	0,84	1,25	1,67	1,91	2,28
	FR 100	0,69	1,18	1,78	1,98	2,01
FB + 5SD	RD	1,24 ≠	1,70 ≠	1,88	2,06	2,62
	ER	0,86	1,47	1,55	1,76	2,80
	FR 25	1,04 ≠	1,43	1,56	1,73	2,18
	FR 50	1,03 ≠	1,37	1,64	1,81	2,40
	FR 75	1,03	1,47 ≠	1,87	2,00	2,25
	FR 100	1,10 ≠	1,47 ≠	1,69	1,90	2,64
FB + 10SD	RD	1,28 ≠	1,85 ≠	1,90	2,14	2,81
	ER	1,00	1,54	1,77 ≠	1,83	1,87
	FR 25	0,89	1,34	1,68	1,92	2,05
	FR 50	0,99 ≠	1,37	1,86 ≠	2,03	2,05
	FR 75	0,93	1,47 ≠	1,59	1,88	2,07
	FR 100	0,80	1,20	1,67	2,06	2,25
FB + 15SD	RD	1,31 ≠	1,67 ≠	1,99 ≠	2,14	2,62
	ER	1,09 ≠	1,43	1,59	1,88	2,36
	FR 25	1,03 ≠	1,48	1,62	1,78	2,00
	FR 50	0,98	1,45	1,69	1,87	2,35
	FR 75	0,95	1,30	1,52	1,71	1,74
	FR 100	0,82	1,33	1,61	1,82	1,81
Valor F		9,41**	4,37**	4,27**	2,52 ns	3,79*

Médias seguidas de ≠ na coluna diferem estatisticamente da Testemunha (ST) pelo teste de *Dunnnett* a 5 %; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; RD: linha do rodado; ER: entre rodado; FR 25: fora do rodado a 25 cm de distância; FR 50: fora do rodado a 50 cm; FR 75: fora do rodado a 75 cm; FR 100: fora do rodado a 100 cm.

Pelos resultados obtidos, ressalta-se a necessidade de medidas para atenuação dos efeitos nocivos da compactação do solo. A restrição ao tráfego das máquinas de colheita da madeira por toda a área, concentrando-se em ramais pré-definidos é uma das soluções que devem ser tomadas. Desta maneira, com o tráfego das máquinas concentrado, não haverá aumentos significativos na compactação, assim reduzindo o impacto provocado sobre o solo e, conseqüentemente, sobre o crescimento do povoamento florestal futuro.

A análise de variância em fatorial (Tabela 25) indicou haver diferenças entre as intensidades de tráfego; entre as posições; e entre as profundidades do solo, havendo interação significativa entre a intensidade de tráfego e a profundidade; entre a posição e a profundidade e não havendo interação entre a intensidade de tráfego e a posição.

A diferença entre as intensidades de tráfego não foram acentuadas (Tabela 26). Em média os maiores valores de resistência à penetração foram encontrados nas condições FB + 5SD e FB, porém, estas condições não diferem da FB + 10SD e FB + 15SD. Este resultado mostra, novamente, que as primeiras passadas geraram as maiores alterações da resistência à penetração deste solo.

Entre as posições era esperada a diferença da posição RD com as demais. Neste solo também se percebeu uma tendência de diminuição dos valores de resistência à penetração, conforme aumentou a distância em relação à linha dos rodados, ou seja, os efeitos da compactação diminuiram lateralmente no solo.

A interação não significativa entre a intensidade de tráfego e a posição, se deveu à distinção dos valores de resistência à penetração conforme as intensidades de tráfego na posição RD, sendo isto não observado nas outras posições, nas quais as diferentes condições submetidas não causaram grandes distinções.

Já as interações entre a intensidade de tráfego e a profundidade, e entre a posição e a profundidade ocorreram devido as diferenças nos valores entre as profundidades conforme o número de passadas das máquinas ou conforme a posição em relação à linha dos rodados.

Tabela 25. Análise de variância em fatorial da resistência do solo à penetração no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).

Fator de Variação	Resistência do Solo à Penetração	
	G.L.	Valor F
Intensidade de Tráfego	5	4,39**
Posição	5	7,34**
Profundidade	4	212,99**
Blocos	1	0,82 ns
Intensidade de Tráfego X Posição	25	0,97 ns
Intensidade de Tráfego X Profundidade	20	1,72*
Posição X Profundidade	20	0,46*

*significativo a 5 % de probabilidade; **significativo a 1 % de probabilidade; ns não significativo.

Tabela 26. Valores médios de resistência do solo à penetração por intensidade de tráfego e posição no Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).

Posição	Intensidade de Tráfego						
	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB+10SD	FB + 15SD	MÉDIA
	MPa						
RD	1,73	1,83	1,67	1,90	1,99	1,95	1,84 A
ER	1,60	1,49	1,45	1,69	1,60	1,67	1,58 B
FR25	1,76	1,56	1,57	1,59	1,58	1,58	1,61 B
FR50	1,66	1,37	1,34	1,65	1,66	1,67	1,56 B
FR75	1,65	1,43	1,59	1,72	1,59	1,44	1,57 B
FR100	1,80	1,54	1,53	1,76	1,60	1,48	1,62 B
MÉDIA	1,70 a	1,54 b	1,53 b	1,72 a	1,67 ab	1,63 ab	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* a 5 %.

5.4. CONCLUSÕES

Neste capítulo, de acordo com a análise e discussão dos resultados, as principais conclusões foram:

- A intensificação do tráfego das máquinas de colheita da madeira provocou aumento na densidade dos solos estudados, sendo que grande parte desse aumento, foi resultante das primeiras passadas das máquinas;

- A porosidade total se mostrou mais sensível às alterações no RLh, onde as primeiras passadas das máquinas de colheita resultaram em reduções significativas desse atributo, enquanto no CHa, reduções significativas da porosidade ocorreram somente após a maior intensidade de tráfego;

- Em relação a resistência à penetração na linha dos rodados no CHa, a maior parte do acréscimo dessa propriedade, ocorreu a partir de uma passada do *Feller-buncher* mais cinco passadas do *Skidder*, ultrapassando o limite de RP crítica cada vez em maior magnitude no perfil de solo com a intensificação do tráfego. Já no RLh, na posição linha dos rodados, a maior parte do aumento foi resultante de uma passada do *Feller-buncher* mais uma passada do *Skidder*, havendo valores acima RP crítica em todas as intensidades de tráfego submetidas;

- Em ambos os solos estudados, houve efeito do tráfego das máquinas até 100 cm de distância, transversalmente à trilha de passagem dos rodados, mostrando que o tráfego causou compactação também lateralmente no perfil de solo, porém, em menor magnitude se comparado à linha dos rodados.

6. CONCLUSÕES GERAIS

– A condição de umidade foi determinante no nível de compactação sofrido pelos solos avaliados. Condições de maior umidade resultaram em redução da resistência dos solos, havendo, conseqüentemente, maiores alterações nas propriedades físicas devido ao tráfego das máquinas de colheita da madeira;

– Quanto mais intenso foi o tráfego das máquinas de colheita da madeira, maiores alterações ocorreram nas propriedades físicas dos solos. Contudo, a maior parte dos impactos avaliados foi resultante das primeiras passadas das máquinas;

– Os modelos propostos para estimativa da compactação, explicaram grande parte das relações entre as propriedades físicas dos solos, possibilitando uma melhor compreensão do efeito do tráfego na alteração dessas propriedades em solos florestais;

– Medidas para redução da compactação do solo devem levar em consideração as condições de umidade, a intensidade de tráfego submetida e as classes de solo. O monitoramento da precipitação e a concentração do tráfego em carreadores pré-determinados, são ações que poderão contribuir para a diminuição da extensão dos efeitos da compactação do solo, reduzindo os impactos ao meio ambiente e às rotações florestais futuras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ADUR, A. F. **Comportamento de um latossolo vermelho-escuro, textura argilosa, quando submetido a diferentes energias de compactação**. Curitiba, 1990. 86 p. Dissertação (Mestrado em Solos) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- ALAKUKU, L. *et al.* Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, 73:145-160, 2003.
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos o solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, 2008. 103 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – USP/ESALQ, SP.
- AMPOORTER, A.; GORIS, R.; CORNELIS, W.M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **Forest Ecology and Management**, 241:162-174, 2007.
- ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, 61:391-398, 1997.
- 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**, v.17, n.1, p. 22 - 25, 1993.
- BACCHI, O. O. S. **Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1976. 67 p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo. Manole, 1987. 307p.
- BALBUENA, R.H.; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P.; MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.**, 4:453-459, 2000.
- BALLARD, T.M. Impacts of forest management on northern forest soils. **Forest Ecology and Management**. 133, 37–42, 2000.
- BARRETO RIQUELME, U. F. **Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro**. 2004. 78 p. (Tese de Mestrado) – UFSM, Santa Maria, RS.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. **Física del Suelos**. México: Ed. Hispano-Americana, 1973.

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5:145-149, 1981.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, mai. 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BORGES, A.L. *et al.* Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.1019-25, 1999.

BRAIS, S.; CAMIRÉ, C. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). **Canadian Journal of Soil Science**. 78, 197–206, 1998.

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

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.

CAMARGO, C.M.S. **Compactação do solo causada pela colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema de fuste (*Tree-length*)**. 1999. 110 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal) – UFPR, Curitiba, PR.

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. 44p.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Piracicaba, Degaspari, 1997. 132p.

CANARACHE, A. Penetrometer - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**. V.16, p.51-70, 1990.

CARTER, M.R. Relations of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. **Soil and Tillage Research**, 15:257-268, 1990.

CECHIN, N. F. **Compactação de dois argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L.** 2007. 134 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Florestal) – UFSM, Santa Maria, RS.

CHAN, K.Y. Bulk density. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. 2nd ed. New York: Taylor and Francis, 2006. p. 128-130.

CINTRA, F.L.D; MIELNICZUK, J; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.323-327, 1983.

CLAYTON, J. L.; KELLOGG, G.; FORRESTER, N. Soil disturbance and tree growth relations in central Idaho clear cuts. **Intermountain Research Station**. Forest Service. United States Department of Agriculture, 1987.

COLETI, J.T.; DEMATTÊ, J.L.I. Compactação artificial em solos experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, v.2, n.6, p.34-39, set./out. 1982.

COLLARES, G.L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 106p. (Tese de Doutorado).

COLLARES, G.L.; REINERT. D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.K. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:1663-1674, 2006.

CONSTANTINI, A.; DUNN, G.M.; GRIMMET, J.L. Towards sustainable management of forest plantation in south-east Queensland. II: Protection soil and water values during second rotation *Pinus* plantation management. **Australian Forestry**, vol. 60, n.4, p.226-232, Aug. 1997.

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

CORNELIS, W.M.; RONSYN, J.; MEIRVENNE, M.van; HARTMANN, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, 65:638-648, 2001.

CORNS, I. G. W. Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. **Canadian Journal of Forestry Research**, v.18, n.1, p. 75-84, jan 1988. Canadá.

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C. A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999, 23:165-173.

COSTA, L.M; COSTA, O.V; OLSZEWSKI, N; NACIF, P.G.S. Influência das características morfológicas, estruturais e texturais do solo na definição do seu preparo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. IPEF: Piracicaba, SP. 2002. p. 205-220.

CURI, N.; LARACH, J.O.I; KAMPF, N.; MONIZ, N.; FONTES, L.E.F. **Vocabulário da ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

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

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 Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.703-709, 1999.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Tese (Doutorado) - East Lansing, Michigan State University, 1994.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.55-94, 2000

DIAS JÚNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R.; FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.371-380, 1999.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v.8, n.2, p.139-151, 1995.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação solo e sua modelagem. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 20: 175-182, 1996.

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

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1 - mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and soil**, v.36, p.613-622, 1972.

EKWUE, E. I.; STONE, R. J. Organic matter effects on strength properties of compacted agricultural soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.2, p.357-367, 1995.

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

EPAGRI/CIRAM. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico**. 2006. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br:8080/cms/zoneamento/zae.jsp>>.

FENNER, P. Relações entre o tráfego de veículos e as deformações físicas do solo florestais. In: IX Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal. **Anais...** Curitiba, 1996.

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

FERNANDEZ-MEDINA, B. Influência de dois métodos de preparo de área na compactação de um latossolo amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, 9:67-71, 1985.

FERNANDEZ, R.; FAHLER, J.; FASSOLA, H.; PAHR, N.; LUPI, A. Influencia de la compactacion producida durante la tala rasa sobre la productividad del segundo ciclo de *Pinus taeda*. **Informe Técnico**, n.3, 1995. EEA Montecarlo, Centro Regional Misiones.

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**, v.24, n.3, p.487-493, 2000.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. New York, John Wiley, 2000. 489 p.

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

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

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

GEIST, J.M.; HAZARD, J. W.; SEIDEL, K. W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p. 946-50, 1989.

GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: USDA, 1968. 511p.

GOMES, A. S.; PENNA, Y. A. Caracterização da compactação do solo através do uso de penetrômetro. **Informe Lavoura Arrozeira**, v. 49, n. 426, mar/jun, 1996. Porto Alegre, RS.

GOMES, F.P. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 160p.

GONZALEZ, F. L. **Morfologie propriétés physiques et conditions de formation del elements structurax de la conche laborée**: contribution à l'interprétation du profil cultural. Paris, 1991, 133 f. These (Doctorat Ingénierie Agronomique) - Institut National Agronomique.

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

GUPTA, S.C.; RAPER, R.L. Prediction of soil compaction under vehicles. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil Compaction in Crop Production**, Amsterdam: Elsevier, 1994.p. 71-90. (Developments in Agricultural Engineering 11).

HAKANSSON, I.; DANFORTH, B. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ISTVS, 7, Calgary, 1981. **Proceedings...** 1981, vol. 1 p.239-253.

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

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

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.; RILES, H.; Vehicle and wheel tractors influencing soil compaction and crops response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research** 11, 239–282, 1988.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

HIRMAS, D.R.; FURQUIM, S.A.C. Simple modification of the clod method for determining bulk density of very gravelly soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 37, n. 7/8, p. 899-906. Sept. 2006.

HOAGLIN, D.C.; MOSTELLER, F.; TYKEY, J.W. **Análisis exploratória de dados: Técnicas robustas, un guia**. Lisboa: Salamandra, 1983. 446p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERT, C. van. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994.p.45-69,

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

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:11-18, 2001.

INCERTI, M.; CLINNIK, P.F.; WILLATT, S.T. Changes in the physical properties of a forest soil following logging. **Australian Forestry Research**, v.17, p.91-98, 1987.

JAKOBSEN, B.F.; GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by Forwarder operations. **Soil and Tillage Research.**, 5:55-70, 1985.

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**, 4:445- 452, 2000.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

KOBIYAMA, M.; FRUET, D.; LIMA, R.T.; MARSCHNER, S.; GUIMARÃES, L.M.R.; CHAFFE, P.L.B. Estudo hidrológico comparativo entre três pequenas bacias experimentais no município de Rio Negrinho – SC. In: ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 12p. (CD-rom).

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

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

LAL, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in Northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, 37:143-160, 1996.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. Basic definitions and concepts: soil components and phases. In: LAL, R. (Ed.). **Principies of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 15-31.

LANÇAS, K.P. **Tráfego, tração e compactação: otimização e desafios**. XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/cbcs/palestras/KleberLancas.pdf>.

LANÇAS, K.P. *et al.* Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**. v.35 n.2, 2005.

LARSON, W. E.; ALLMARAS, R. P. Management factors and natural forces as related to compaction. In: **Compaction in agricultural soils**. St. Joseph: Am. Soc. Agric. Eng. Monogr., 1971. p. 367-427

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

LAURANI, R.A.; RALISCH, R.; FILHO, J.T.; SOARES, D.S.; RIBON, A.A. Distribuição de poros de um Latossolo Vermelho Eutroférico na fase de implantação de um sistema de plantio direto. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.24, n.2, p.347-354, 2004.

LEVY, G.J.; MILLER, W.P. Aggregate stabilities of some Southeastern U.S. soils. **Soil Science Society of America Journal**, 61:1176- 1182, 1997.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. 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**, v.36, p.1172-1178, 2006.

LIMA, C.L.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, 37:1166-1169, 2007.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geostatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, v. 32, n.5, p.931-938, 2008.

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.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compactation effects o soil physicals properties and crop growth. **Geoderma**, Arizona v. 116, p. 107-136, 2003.

LOPES, E. S. **Aplicação do programa SNAP III (Scheduling and Network Analysis Program) no planejamento da colheita e do transporte florestal**. Tese (Doutorado), Viçosa: UFV, 2001. 150p.

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

MACHADO, C. C.. **Colheita Florestal** (2 ed). Viçosa: UFV, 2008. 501p.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Revista Cerne**, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MACYK, T.M.; RICHENS, T.C. **Reclamation criteria for wellsites and associated facilities-update**. Volume III: Technical rationale document. 2004. Disponível em: <<http://www3.gov.ab.ca/env/info/infocentre/publist.cfm>>.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informativo Agropecuário**, v.13, n.17, p.52-55, 1987.

MATTHIES, R. K.; WATSON, W. F. Measurements of a pressure at the soil-tire interface of a rubber-tired skidder. **ASAE Paper**, St. Joseph, n.89-7066, 1989.

MELO, D. **Compactação do solo nas camadas agricultáveis nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Cascavel: UNIOESTE, 2006. 73p.

MISRA, R.K.; GIBBONS, A.K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. **Plant Soil**, v.182, p.1-11, 1996.

MOEHRING, D.M.; RAWLS, I.W. Detrimental effects of wet weather logging. **Journal of Forestry**, 68: 166-167, 1970.

MÓSENA, M.; DILLENBURG, L.R. Early growth of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*) in response to soil compaction and drought. **Plant Soil**, 258:193-306, 2004.

NAMBIAR, E. K. S. Sustained productivity of forestry is a continuing challenge to soil science. **Soil Science Society American Journal**, v. 60, p. 1629-1642, 1996.

NUGENT, C.; KANALI, C.; OWENDE, P.M.O.; NIEUWENHUIS, M.; WARD, S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. **Forest Ecology and Management**, 180:85-98, 2003.

O'SULLIVAN; M.F; SIMOTA, C. Modelling the environmental impacts of soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 35, p. 69-84, 1995.

OBERHAUSER, A.G.; SILVA, S.R.; BARROS, N.F. Crescimento de eucalipto e densidade de dois Latossolos influenciados pela compactação do solo a diferentes umidades. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25. Rio de Janeiro, 2002. **Anais...** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROOM

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulical characteristic of compacted soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 420-424, 1985.

OLIVEIRA, E. B. SIPLAN – Software para tomada de decisão florestal. In: SIMPÓSIO ÍBERO – AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA FLORESTAL, 1, 2001. Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: IPEF/USP, 2001. p. 76-84.

OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G.; PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropecuário**. EPAMIG, v. 19, n. 191, p. 46-48, 1998. Belo Horizonte, MG.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. **Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a duas pressões diferentes**. Dissertação de Mestrado, São Paulo: USP/ESALQ, 1998. 68p.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. *et al.* Estudos prévios previnem compactação do solo. **Revista da Madeira**. nº 82. 2004.

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

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil and Tillage Research**, 46:203-208, 1998.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

PERDOK, U. D.; ARTS, W. B. M. The performance of agricultural tyres in soft soil conditions. **Soil and Tillage Res.**, Amsterdam, v.10, p.319-330, 1987.

PRIKNER, P.; LACHNIT, F; DVORAK, F. A new soil core sampler for determination bulk density in soil profile. **Plant Soil and Environment**, Slezská, v. 50, n. 6, p. 250-256, June, 2004.

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, v. 35, p. 929-938, 2000.

RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. **Journal of Terramechanics**, Elmsford, v.19, p.235-242, 1983.

RAPER, R.; ERBACH, D. Prediction of soil stresses using the finite element method. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, 33:725-730, 1990.

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**, volume v. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.V.; SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 16., Aracaju, 2006. **Palestras**. Aracaju, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. CD-ROM.

REINERT, D.J.; COLLARES, G.L.; REICHERT, J.M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: Desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, 27:304-316, 2007.

RIBON, A.A. **Estudo da resistência a penetração em Latossolos**. Londrina, Universidade Estadual de Londrina, 2004. 113p. (Tese de Doutorado)

RIBON, A.R.; TAVARES FILHO, J. Model propositions for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 47:25-31, 2004.

RIBON, A. R.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1817-1815, 2008.

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

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** Brasília, v.34, p.821-828, 1999.

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

SANDER, T; GERKE, H. H. Noncontact shrinkage curve determination for soil clods and aggregates by three-dimensional optical scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 5, p. 1448-1454, Sept./Oct. 2007.

SANDS, R. Physical changes to sandy soils planted to *radiata pine* proceeding. **IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity**. Seattle, Washington, p. 146-152, 1982.

SANDS, R.; GREACEN, E. L.; GERARD, C. J. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. I. A penetrometer study. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.17, p. 101-113, 1979.

SAUTTER, K.D. **Efeitos da compactação em um Latossolo Vermelho-Escuro, causada pela colheita de *Eucalyptus grandis*, sobre alguns organismos do solo**. 2001. 103 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Florestal) – UFPR, Curitiba, PR.

SCHAFFER, R.L.; BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; RAPER, R.L. A rationale for modeling soil compaction behavior: an engineering mechanics approach. **ASAE Paper**, St. Joseph, n. 89-10987, 1989.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. 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.

SEIXAS, F. **Estudo comparativo entre dois sistemas operacionais de exploração de madeira utilizando toras com diferentes comprimentos**. Campinas, SP. UNICAMP, 1985.

144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Campinas, Campinas.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal**. Causas, efeitos e práticas de controle. Ipef - Circular Técnica, Piracicaba, n. 163, p.1-11, 1988.

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 p. Tese (Livredocência) – ESALQ/USP, Piracicaba, SP. 2000.

SEIXAS, F. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. IPEF: Piracicaba, SP. 2002. p. 313-350.

SEIXAS, F. Olho na Terra. **Revista Cultivar Máquinas**, v. 2, n. 7, p. 15-17, 2002b.

SEIXAS, F. Extração. In: Machado, C. C. (Ed.) **Colheita Florestal** (2 ed). Viçosa: UFV, 2008. p.97-145.

SEIXAS, F.; McDONALD, T.P.; STOCKES, B.J.; RAPER R.L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 18., Cashiers, 1995. **Proceedings**. Cashiers, 1995. p.77-86.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 73-87, dez. 2001.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**, Viçosa, n. 54, p.9-16, 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, Melbourne, 1998. **Proceedings**. Melbourne, Natural Resources and Environment, 1998. p.156-157.

SEIXAS, F.; SOUZA, C.R. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:1047-1052, 2007.

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

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; VILAS BOAS, J.E.B. Crescimento e nutrição do eucalipto com respostas à compactação de Latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30-759-768, 2006.

SILVA, S.R. *et al.* Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um *Forwarder* nas entrelinhas de uma florestal de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:371-377, 2007.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 p. (Tese de Doutorado) – UFSM, Santa Maria, RS.

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**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, V.R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ci. Rural**, 34:399-406, 2004.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v.41, n.1/2, p.53-73, 1997.

SMITH, H., DICKSON, L. The contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 46, 13–29, 1992.

SOANE, B.D. The role of field traffic studies in soil management research. **Soil and Tillage Research**. 1, 205–237, 1980.

SOANE, B.D. Process of soil compaction under vehicular traffic and means of alleviating it. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A.; CUMMINGS, R.W. **Land clearing and development in the tropics**. Rotterdam: Balkema Publisher, 1986. p.265-297.

SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W. *et al.* Compaction by agricultural vehicles: a review I. Soil and wheel characteristics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.1, p.207-237, 1981.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C., eds. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. p. 01-21.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). I. Efeito nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

STRECK C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, 34:755-760, 2004.

TAYLOR, H.M., GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength soil. **Soil Science**, v.96, p.153-156, 1963.

TEEPE, R., BRUMME, R., BEESE, F., LUDIG, B. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society of America Journal** 68, 605–611, 2004.

TIMM, L.C *et al.* Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998a.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998b.

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

VALENTIN, J.L. **Ecologia numérica**. Uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos. Interciência. Rio de Janeiro. 117p. 2000.

VAZ, C.M.P.; BASSOI, L.H.; HOPMANS, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil and Tillage Research**. 60, 35–42, 2001.

VIEIRA, M. J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A. L.; TORRADO, P. V.; MACHADO, J. **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 163-179

WARKOTSCH, W. The impact of harvesting operation on timber quality: causes and remedies. **South African Forestry Journal**, n. 169, jun 1994.

WASTERLUND, I. Compaction of till soils and growth test with Norway Spruce and Scots Pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.11, p.171-189, 1985.

WHALLEY, W.R.; DUMITRU, E.; DEXTER, A.R.. Biological effects of soil compaction. **Soil and Tillage Research**. 35, 53–68, 1995.

WORREL, R.; HAMPSON A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils, a review. Institute of Chartered Foresters. **Forestry**, v. 70, n.1, 1997.

WRONSKI, E.B. Impact of tractor thinning operations on soils and tree roots in a karri forest, Western Australia, **Australian Forest Research**, 14:319-32, 1984.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, 28:947-958, 2000.

8. ANEXOS

Análise química e granulométrica do Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa).

Profundidade (cm)	Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHa)														
	CaCl (pH)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Na ⁺	C-org (g.dm ⁻³)	P (mg.dm ⁻³)	V (%)	Areia grossa	Areia fina (g.kg ⁻¹)	Silte	Argila
0 ─ 15	3,55	0,029	0,33	1,73	2,06	3,66	10,07	0,187	21,03	5,03	18,43	79,5	567,5	133,0	220,0
15 ─ 30	3,97	0,025	0,52	1,4	1,92	3,29	8,81	0,187	20,25	3,89	19,48	13,68	497,5	153,7	212,0
30 ─ 50	4,15	0,025	0,38	1,1	1,48	2,77	8,42	0,191	18,31	2,88	16,76	11,37	526,5	59,8	300,0

Análise química e granulométrica do Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh).

Profundidade (cm)	Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh)														
	CaCl (pH)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Na ⁺	C-org (g.dm ⁻³)	P (mg.dm ⁻³)	V (%)	Areia grossa	Areia fina (g.kg ⁻¹)	Silte	Argila
0 ─ 15	3,62	0,072	1	0,15	1,15	3,2	10,85	0,2	26,80	3,41	11,58	42,05	591,35	204,6	162,0
15 ─ 30	3,74	0,072	0,6	0,15	0,75	3,15	11,68	0,3	32,83	2,77	8,76	147,55	482,55	184,0	186,0
30 ─ 50	3,87	0,08	0,6	0,15	0,75	3,2	10,45	0,33	28,81	3,03	9,99	110,5	539,5	16,0	334,0

Análise química e granulométrica do Neossolo Litólico Húmico típico (RLh).

Profundidade (cm)	Neossolo Litólico Húmico típico (RLh)											Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
	CaCl (pH)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c .dm ⁻³)	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Na ⁺	C-org (g.dm ⁻³)	P (mg.dm ⁻³)	V (%)				
0 — 15	3,65	0,072	0,6	0,35	0,95	3,6	10,07	0,228	25,69	1,87	11,04	249,6	205,8	112,6	432,0
15 — 30	3,71	0,064	0,75	0,5	1,25	3,8	11,42	0,244	21,01	1,87	12	235,5	242,7	91,8	430,0
30 — 50	3,78	0,08	0,7	0,55	1,25	3,7	11,01	0,32	22,32	1,41	13,03	156,7	329,3	34,0	480,0