

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E
TRAFEGABILIDADE DE SOLOS EM PLANTIOS
FLORESTAIS**

TESE DE DOUTORADO

Jean Alberto Sampietro

Santa Maria, RS, Brasil

2013

PPGER/UFSC, SAMPIETRO, Jean Alberto Doutor 2013

PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRAFEGABILIDADE DE SOLOS EM PLANTIOS FLORESTAIS

Jean Alberto Sampietro

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Sampietro, Jean Alberto

Propriedades mecânicas e trafegabilidade de solos em plantios florestais / Jean Alberto Sampietro. – 2013.

233 p.; 30cm

Orientador: José Miguel Reichert

Coorientadores: Frederico Dimas Fleig, Miguel Antão

Durlo

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2013.

1. Implantação florestal 2. Colheita florestal
Mecanizada 3. Compactação do solo 4. Propriedades
Mecânicas 5. Capacidade de suporte I. Reichert, José
Miguel II. Fleig, Frederico Dimas III. Durlo, Miguel
Antão IV. Título

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Jean Alberto Sampietro. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRAFEGABILIDADE DE SOLOS EM
PLANTIOS FLORESTAIS**

elaborada por
Jean Alberto Sampietro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ana Paula Moreira Rovedder, Dr. (UFSM)

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)

Nilton César Fiedler, Dr. (UFES)

Luis Carlos Timm, Dr. (UFPeI)

Santa Maria, 31 de janeiro de 2013.

A Deus,
AGRADEÇO

À minha querida, muito amada e incentivadora mãe Ana Maria Sampietro, ao meu sempre amado pai Gumercindo Sampietro Sobrinho (*in memorian*), à minha amada esposa Silvane de Fátima Siqueira, à minha muito, muito amada filha Marianna Siqueira Sampietro, 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 e aos meus tios e sobrinhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus que ilumina e abençoa meu caminho;

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e aos Departamentos de Engenharia Florestal e de Solos, pelo acolhimento e possibilidade de realização deste trabalho;

À CMPC Celulose Riograndense, pelo interesse, incentivo, financiamento e apoio fundamental à pesquisa. Aos Engenheiros Florestais Loivo Copetti, Enio Paiva Simões Pires, Norton Borges Júnior, em especial ao Engenheiro Florestal MSc. Elias Frank de Araujo, pela colaboração, sugestões e informações prestadas. E à prestadora de serviços SERTEF e seus funcionários, em especial ao Sr. Renato Didio pelo grande auxílio nos trabalhos de campo;

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Prof. PhD. José Miguel Reichert, pela valiosa orientação, dedicação, amizade, estímulo, confiança, paciência e compreensão no desenvolvimento e conclusão deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e Ciência do Solo: Dr. Frederico Dimas Fleig, Dr. Miguel Antão Durlo, Dr. César Augusto Guimarães Finger, Dr. Paulo Renato Shneider, Dr. nat. Techn. Mauro Valdir Schumacher, Dr. Solon Jonas Longhi, Dr. Ivanor Müller, Dr. Jean Paolo Gomes Minella e PhD. Dalvan José Reinert, pelas sugestões e ensinamentos durante o curso;

Ao técnico Flavio Fontinelli pelo apoio, paciência e colaboração na realização das análises laboratoriais. E às secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal Cerlene Machado e Rone Maria David, pela amizade, carinho e atenção;

Aos colegas e amigos de pós-graduação e do Laboratório de Física do Solo, e, em especial, aos companheiros Cedíndara e Bruno Morales, Eloi Paulus, Adriano Gonçalves, Eduardo Vogelmann, Eracilda Fontanela, Juliana Prevedello, Júlio Soares, Marton Matana (*in memorian*), Paulo Gubiani, Neiva Gelain, Denise Szymczak, Samara da Rocha, Pedro Borges, Rodrigo Ludwig, Rafael Goulart, Sérgio Costa, Davi Vieira, Cláudia Barros, Marcelo Mentges e Marta Dresscher pela dedicação, apoio, colaboração e amizade incondicionais;

À minha família, em especial aos meus pais, Ana Maria Sampietro e Gumercindo Sampietro Sobrinho (*in memorian*), que nunca mediram esforços para a minha formação pessoal e profissional, à minha esposa Silvane Siqueira, por me apoiar com amor, confiança e compreensão, e à minha filha Marianna Sampietro, que é a minha motivação para tudo;

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

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”.

(Albert Einstein)

“Suba o Primeiro degrau com fé. Não é
necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo”.

(Martin Luther King Jr.)

“Se o conhecimento pode criar problemas,
não é através da ignorância que podemos
solucioná-los”.

(Isaac Asimov)

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRAFEGABILIDADE DE SOLOS EM PLANTIOS FLORESTAIS

AUTOR: JEAN ALBERTO SAMPIETRO

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 31 de janeiro de 2013.

A mecanização possibilitou aumento da produtividade, qualidade e redução de custos das atividades para o cultivo de florestas. Entretanto, tem sido responsável por impactos ambientais, destacando-se a compactação do solo, a qual é resultado do tráfego intenso de máquinas, principalmente nas operações de colheita. Os objetivos desta pesquisa foram avaliar a qualidade física, trafegabilidade e a compactação de solos, em função do tráfego de máquinas de colheita da madeira de *Eucalyptus* sp. e desenvolver funções para a estimativa de propriedades físicas e mecânicas. A pesquisa foi desenvolvida em solos advindos de áreas de implantação de povoamentos de *Eucalyptus* sp., e de uma área operacional de colheita de *Eucalyptus saligna* Sm., pertencentes à empresa CMPC Celulose Riograndense. Para responder as hipóteses e atender aos objetivos, o trabalho foi dividido em dois estudos. No Estudo I, foram avaliados cinco solos de uso florestal de diferentes composições texturais, determinando-se os indicadores de qualidade física, indicadores de trafegabilidade advindos do ensaio de Proctor Normal e compressão uniaxial, e limites de consistência. Os principais resultados mostraram que os indicadores de qualidade física e de trafegabilidade foram relacionados aos atributos texturais, podendo ser estimados a partir destes, além de serem influenciados por diferentes estados de compactação. Além disso, constatou-se que a alteração da capacidade de suporte resultou na alteração do intervalo hídrico ótimo, sendo estes relacionados, permitindo, assim, ser estimada a pressão crítica para o crescimento de plantas. No Estudo II, foi avaliado o efeito de diferentes intensidades de tráfego de um *Harvester* e um *Forwarder* sobre um Cambissolo Háplico de textura franco-arenosa em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Smith, por meio da determinação da área de contato, pressão exercida pelas máquinas sobre o solo, densidade, distribuição de tamanho de poros, curva de retenção de água, conteúdo de água disponível, condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade ao ar, resistência do solo à penetração, compressibilidade, grau de compactação e resistência ao cisalhamento. Foram avaliadas, também, as relações dessas propriedades e parâmetros. Os principais resultados indicaram que poucas passadas das máquinas (uma do *Harvester* e quatro do *Forwarder*) foram responsáveis em grande parte pela deformação e alteração de todas as propriedades e parâmetros. Os efeitos foram maiores até os 20 cm de profundidade. Entretanto, o aumento do número de passadas também causou alterações nas camadas mais profundas do solo. Em geral, os efeitos foram maiores na zona abaixo da trilha dos rodados, porém, ainda ocorreram efeitos nas zonas entre os rodados e fora da trilha dos rodados das máquinas. Conclui-se que as ações para minimização da compactação de solos florestais devem estar associadas às condições de umidade, intensidade de tráfego e tipo de solo.

Palavras-chave: implantação florestal, colheita florestal mecanizada, compactação do solo, propriedades mecânicas, capacidade de suporte, intervalo hídrico ótimo, pressões críticas.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

MECHANICAL PROPERTIES AND TRAFFICABILITY OF SOILS IN FOREST PLANTATIONS

AUTHOR: JEAN ALBERTO SAMPIETRO
ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT
Place and Date: Santa Maria, January 31st, 2013.

Mechanization significantly increased the productivity, quality and cost reduction for forests cultivation. However, it may be responsible for environmental impacts, such as soil compaction, which is a result of traffic, mostly during wood harvesting operations. The objectives of this research were to evaluate the physical quality, trafficability and soil compaction due to traffic of wood harvesting machines of *Eucalyptus* sp. and developing functions to estimate physical and mechanical properties. The research was conducted in soils coming from implantation areas of *Eucalyptus* sp., and from an operational area of harvesting of *Eucalyptus saligna* Sm, belonging to CMPC Celulose Riograndense. To answer the hypotheses and meet the objectives, this work was divided into two studies. In Study I, five forest soils with different textural compositions were evaluated, determining physical quality indicators, trafficability indicators coming from the Proctor Normal test and uniaxial compression, and Atterberg consistency limits. The main results showed that both indicators of physical and trafficability were related to textural composition of soil, being estimated from these, as well as being influenced by different states of compaction. Furthermore, it was found that changing the bearing capacity has resulted in alteration of least limiting water range, which are related and, in this way, allowed to estimate the critical pressure for the plants growth. In Study II, we assessed the effect of different traffic intensities of a *Harvester* and a *Forwarder* on a Haplic Cambissol with sandy loam texture in *Eucalyptus saligna* Sm. stands, by determining the machines contact area and ground pressure exerted on soil, bulk density, pore size distribution, water retention curve, available water content, saturated hydraulic conductivity, air permeability, penetration resistance, compressibility, degree of compaction and shear strength. Were also evaluated the relationship of these properties and parameters. The main results indicated that few machines passes (one pass of *Harvester* and the four more of *Forwarder*) resulted in great part in soil deformation and changing in all evaluated properties and parameters. Mostly effects occurred until the depth of 20 cm. However, increasing the number of passes also caused changes in the deeper layers of soil. In general, the effects were higher in the area below within tracks, but, even so, effects occurred in areas between the wheels tracks and outside the areas of machines tracks. It was concluded that actions to minimize the compaction of forest soils should be associated with moisture conditions, traffic intensity and soil type.

Keywords: forest implantation, mechanized wood harvesting, soil compaction, mechanical properties, soil bearing capacity, least limiting water range, critical pressures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da colheita de madeira, partindo do uso de motosserras (a) e tratores agrícolas adaptados (b) para tratores florestais como <i>Feller Bunchers</i> (c), <i>Skidders</i> (d) e <i>Forwarders</i> (e). Fontes: arquivo pessoal, www.deere.com	6
Figura 2 – Pressão no solo em função de sua capacidade de suporte ou resistência, em condições padronizadas de peso da máquina e pressão de inflação dos pneus. Fonte: Adaptado de Söhne (1958).....	13
Figura 3 – Estados de consistência do solo em função do conteúdo de água. Fonte: Reichert et al. (2010).....	16
Figura 4 – Curva de compressão do solo quando não sofreu pressões prévias (a) e quando sofreu pressões prévias em seu histórico ou ação de processos naturais. Fonte: Reichert et al. (2010).	18
Figura 5 – Interações solo-máquina e seus efeitos. Adaptado de Wästerlund (1994).....	22
Figura 6 – Localização dos municípios de São Gabriel (superior) e Dom Feliciano (inferior) no Estado do Rio Grande do Sul e dos hortos florestais (pontos vermelhos em cada município) em que se situam as áreas experimentais. Fonte: maps.google.com	26
Figura 7 – Operação de preparo do solo; (a) trator agrícola empregado; (b) aspecto do solo após revolvimento.	28
Figura 8 – Trincheiras abertas para a coleta de amostras (a); amostragem em patamares (b); equipamento utilizado para a amostragem (c); amostra com estrutura preservada após ser retirada do solo (d).....	29
Figura 9 – Consolidômetro utilizado nos ensaios de compressão uniaxial.	34
Figura 10 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.	42
Figura 11 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica, considerando RP crítica de 2 MPa.....	43
Figura 12 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.	44

Figura 13 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.	45
Figura 14 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.	46
Figura 15 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{ScIHO_{RP2MPa}}$) e a 3 MPa ($D_{ScIHO_{RP3MPa}}$), com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f); *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	49
Figura 16 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função da densidade do solo para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.	51
Figura 17 – Variação do conteúdo de água disponível em função da densidade do solo para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.....	53
Figura 18 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.....	54
Figura 19 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.....	55
Figura 20 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.....	56
Figura 21 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.....	57
Figura 22 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.	58

Figura 23 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).....	60
Figura 24 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).....	61
Figura 25 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).	62
Figura 26 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).	63
Figura 27 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)..	64
Figura 28 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).	67
Figura 29 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).	68
Figura 30 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).	69
Figura 31 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).	70
Figura 32 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd).....	71
Figura 33 – Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas. R^2 : coeficiente de determinação; **significativo a 1%.	72
Figura 34 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo máxima com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	76
Figura 35 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.....	78
Figura 36 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a relação umidade ótima de compactação (U_{OC}) e limite de plasticidade (LP) com os conteúdos de argila (a), silte (b),	

argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f); *significativo a 5%; ns não significativo.....	80
Figura 37 – Grau de compactação considerando a relação $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ e $D_{S_{MAX}}$ (a), e $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$ e $D_{S_{MAX}}$ (b) para as quatro camadas dos solos avaliados; linhas tracejadas laranja e vermelha indicam grau de compactação a 85 e 95 %, respectivamente.	83
Figura 38 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o grau de compactação considerando a relação $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ e $D_{S_{MAX}}$, e $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$ e $D_{S_{MAX}}$; com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). ns não significativo.	84
Figura 39 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a pressão de pré-consolidação com a densidade do solo (a), umidade volumétrica (b), conteúdos de argila (c), silte (d), argila mais silte (e), areia fina (f), areia grossa (g) e carbono orgânico do solo (h). **significativo a 1%; ns não significativo.....	88
Figura 40 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.....	91
Figura 41 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.	92
Figura 42 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.	93
Figura 43 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.	94
Figura 44 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.	95
Figura 45 – Distribuição percentual dos resíduos em relação aos valores observados de pressão de pré-consolidação da equação usando variáveis logaritmizadas.	98
Figura 46 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre índice de compressão com a densidade do solo (a), umidade volumétrica (b), conteúdos de argila (c), silte (d), argila mais silte (e), areia fina (f), areia grossa (g) e carbono orgânico do solo (h). **significativo a 1%; ns não significativo.....	100

Figura 47 – Distribuição percentual dos resíduos em relação aos valores observados de índice de compressão.	102
Figura 48 – Variação do índice de compressão na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo) em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas dos solos avaliados.	103
Figura 49 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).	105
Figura 50 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).	106
Figura 51 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).	107
Figura 52 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).	108
Figura 53 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd).	109
Figura 54 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.	111
Figura 55 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.	112
Figura 56 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade	

ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.....	113
Figura 57 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.....	114
Figura 58 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente. .	115
Figura 59 – Esquema de derrubada, processamento e extração das árvores pelo sistema de colheita da madeira de Toras Curtas (<i>Cut-to-length</i>) (Adaptado de Silva, 2003b).	122
Figura 60 – Trator florestal <i>Harvester</i> utilizado para a derrubada e processamento das árvores.	123
Figura 61 – Trator florestal <i>Forwarder</i> utilizado para a extração da madeira para a margem da estrada.	123
Figura 62 – Aspecto do local selecionado na área do experimento.....	125
Figura 63 – Desenho do esquema amostral, mostrando a distribuição das parcelas e dos pontos amostrais em cada posição; ST = sem tráfego; H = 1 passada <i>Harvester</i> ; H+2F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 2 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+4F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 4 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+8F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 8 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+16F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 16 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+32F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 32 passadas do <i>Forwarder</i> ; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.....	126
Figura 64 – Determinação de área de contato pneu-solo. Demarcação do rodado do <i>Harvester</i> (a) e do <i>Forwarder</i> (b); foto digital com trena como referência (c).....	128
Figura 65 – Moldura quadrada utilizada para determinação da camada de resíduos.....	129
Figura 66 – Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado. Fonte: Abrão (2011).	130
Figura 67 – Permeâmetro de fluxo constante de ar utilizado nas medições de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura de solo preservada. Fonte: Abrão (2011).	131
Figura 68 – Prensa de cisalhamento direto e compressão uniaxial do solo; (a) vista frontal e (b) lateral do equipamento; (c) área de teste onde a amostra é colocada para ensaio sobre o tensiômetro e; (d) vista do ensaio sendo realizado, com a amostra inserida na área de teste e tensão normal sendo aplicada.	132

Figura 69 – Desenho do esquema das medições de resistência à penetração nas posições em relação à trilha de tráfego das máquinas de colheita da madeira.....	133
Figura 70 – Aspecto do solo após as sucessivas passadas das máquinas.....	137
Figura 71 – Curvas de retenção de água em função das diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada <i>Harvester</i> ; H+1F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 1 passada do <i>Forwarder</i> ; H+2F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 2 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+4F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 4 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+8F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 8 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+16F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 16 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+32F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 32 passadas do <i>Forwarder</i> ; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5 % pelo teste de Tukey; *significativo a 5%; ns não significativo.	147
Figura 72 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o logaritmo natural da condutividade hidráulica do solo saturado com a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e classes de tamanho de poros no Cambissolo Háplico Tb Distrófico. *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	151
Figura 73 – Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) em logaritmo natural nas diferentes intensidades de tráfego, posição de trilha dos rodados (a) e entre rodados (b) nas quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada <i>Harvester</i> ; H+1F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 1 passada do <i>Forwarder</i> ; H+2F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 2 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+4F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 4 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+8F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 8 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+16F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 16 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+32F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 32 passadas do <i>Forwarder</i> ; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados; linhas tracejadas laranja e vermelha indicam valor limite de Ksat para camada em função da $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ e $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, respectivamente; linha tracejada preta indica valor limite de Ksat em função da macroporosidade igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada de 40 a 60 cm.....	153
Figura 74 – Permeabilidade do solo ao ar em logaritmo base dez nas tensões de água de 6 kPa (a,b), 10 kPa (c,d), 33 kPa (e,f) e 100 kPa (g,h); ST = sem tráfego; H = 1 passada <i>Harvester</i> ; H+1F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 1 passada do <i>Forwarder</i> ; H+2F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 2 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+4F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 4 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+8F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 8 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+16F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 16 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+32F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 32 passadas do <i>Forwarder</i> ; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados; linhas tracejadas vermelha e preta indicam valor limite de K_a em função da $D_{s_c}IHO_{3MPa}$ e de acordo com Fish e Koppi (1994), respectivamente.	158
Figura 75 – Valores médios de resistência do solo à penetração a campo para as diferentes intensidades de tráfego nas posições de trilhas dos rodados (a) e entre rodados (b) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada <i>Harvester</i> ; H+1F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 1 passada do <i>Forwarder</i> ; H+2F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 2 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+4F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 4 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+8F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 8 passadas do <i>Forwarder</i> ; H+16F = 1 passada do <i>Harvester</i> + 16	

passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados. 159

Figura 76 – Efeito dos tratamentos ao longo do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico em isolinhas de RPC; (a) ST = sem tráfego; (b) H = 1 passada *Harvester*; (c) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (d) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (e) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (f) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (g) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (h) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*. A legenda a direita indica os valores de resistência do solo à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados..... 162

Figura 77 – Efeito dos tratamentos ao longo do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico em isolinhas de incremento de RPC; (a) H = 1 passada *Harvester*; (b) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (c) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (d) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (e) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (f) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (g) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*. A legenda a direita indica os valores de incremento em resistência do solo à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados..... 163

Figura 78 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes intensidades de tráfego nas quatro camadas do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; (a) ST = sem tráfego; (b) H = 1 passada *Harvester*; (c) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (d) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (e) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (f) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (g) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (h) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; θ_{PA} = umidade em que a porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{CC} = umidade na capacidade de campo; θ_{RP} = umidade em que a resistência do solo à penetração é igual a 3 MPa; θ_{PMP} = umidade no ponto de murcha permanente..... 165

Figura 79 – Curvas de compressão (a, c, e, g) e curvas de compressão normalizadas (b, d, f, h) na tensão de água de 10 kPa em função das diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*..... 170

Figura 80 – Envoltórias de cisalhamento em função das diferentes intensidades de tráfego para as camadas de 0 a 10 cm (a), 10 a 20 cm (b), 20 a 40 cm (c) e 40 a 60 cm (d) de profundidade do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*..... 174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conteúdos médios de argila, silte, areia fina e grossa, cascalho, carbono orgânico e densidade de partículas (\pm desvio padrão) para as quatro camadas dos solos avaliados.....	37
Tabela 2 – Equações ajustadas para estimativa da umidade volumétrica do solo (θ) em função da tensão de água (Ψ_m) e da densidade (D_s) para as quatro camadas dos solos avaliados.	39
Tabela 3 – Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ) e da densidade (D_s) para as quatro camadas dos solos avaliados.	40
Tabela 4 – Valores de densidade crítica (D_{s_cIHO}) e limites superior e inferior para o intervalo hídrico em máxima amplitude (IHO_{MAX}) e quando igual a zero ($IHO = 0$), considerando-se RP crítica de 2 e 3 MPa para as quatro camadas dos solos avaliados.	47
Tabela 5 – Equações ajustadas para estimativa da densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$) e a 3 MPa ($D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$).....	50
Tabela 6 – Densidade máxima ($D_{s_{MAX}}$), umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e intervalo de plasticidade por Atterberg para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.	74
Tabela 7 – Equações ajustadas para estimativa da densidade máxima ($D_{s_{MAX}}$), umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e relação umidade ótima de compactação (U_{OC}) e limite de plasticidade (LP).....	81
Tabela 8 – Estatística descritiva das propriedades, atributos e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão dos solos avaliados.	85
Tabela 9 – Estatística descritiva para as propriedades e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão para as quatro camadas dos solos avaliados.	86
Tabela 10 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação (σ_p) em função da umidade volumétrica (θ) e da densidade (D_s) para as quatro camadas dos solos avaliados.	90
Tabela 11 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação.	97
Tabela 12 – Equação ajustada para estimativa do índice de compressão.....	101
Tabela 13 – Valores de pressão de pré-consolidação crítica (kPa) nos limites superior e inferior, considerando a densidade crítica com resistência à penetração crítica de 2 MPa e 3 MPa para as quatro camadas dos solos avaliados.	116
Tabela 14 – Características do povoamento florestal.....	121
Tabela 15 – Características das máquinas de colheita da madeira avaliadas.....	124
Tabela 16 – Valores de área de contato e pressão exercida pelas máquinas sobre o solo.....	135
Tabela 17 – Valores médios de quantidade de resíduos (\pm desvio padrão) por bloco na área do experimento.	137

Tabela 18 – Valores médios de densidade e porosidade total (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	138
Tabela 19 – Valores médios de macro e microporosidade (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	142
Tabela 20 – Valores médios de poros de diâmetro de 50 a 30 μm e 30 a 10 μm (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	143
Tabela 21 – Valores médios de poros de diâmetro de 10 a 3 μm e menor que 3 μm (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	144
Tabela 22 – Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), poros com diâmetro entre a 50 a 30 μm ($P_{\varnothing 50-30}$), 30 a 10 μm ($P_{\varnothing 30-10}$), 10 a 3 μm ($P_{\varnothing 10-3}$) e menor que 3 μm ($P_{\varnothing <3}$) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	145
Tabela 23 – Valores médios de umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	148
Tabela 24 – Valores médios de conteúdo de água disponível (\pm desvio padrão) e condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	149
Tabela 25 – Equações ajustadas para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado em logaritmo natural para as quatro camadas avaliadas no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	152
Tabela 26 – Valores médios de permeabilidade do solo ao ar (\pm desvio padrão) nas tensões de água de 6 e 10 kPa nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	154
Tabela 27 – Valores médios de permeabilidade do solo ar (\pm desvio padrão) nas tensões de água de 33 e 100 kPa nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	155
Tabela 28 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o logaritmo natural da permeabilidade do solo ao ar nas tensões de água de 6, 10, 33 e 100 kPa com a densidade (Ds), porosidade total (Pt), classes de tamanho de poros e logaritmo natural da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	156
Tabela 29 – Equações ajustadas para estimativa da permeabilidade do solo ao ar em logaritmo natural nas tensões de água de 6, 10, 33 e 100 kPa no Cambissolo Háplico Tb Distrófico..	157
Tabela 30 – Valores médios de resistência do solo à penetração a campo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as seis camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.....	160

Tabela 31 – Valores médios de pressão de pré-consolidação (\pm desvio padrão) na umidade durante os ensaios de tráfego (condição de campo) e nas tensões de água de 10 e 100 kPa, nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.	167
Tabela 32 – Valores médios de índice de compressão (\pm desvio padrão) na umidade durante os ensaios de tráfego (condição de campo) e nas tensões de água de 10 e 100 kPa nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.	169
Tabela 33 – Valores médios de grau de compactação (\pm desvio padrão) utilizando como densidade de referência a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio Proctor Normal ($D_{S_{MAX}}$) e as densidades obtidas após a aplicação da tensão normal de 400 kPa ($D_{S_{Ref400}}$), 800 kPa ($D_{S_{Ref800}}$) e 1600 kPa ($D_{S_{Ref1600}}$) no ensaio de compressão uniaxial, para as diferentes intensidades de tráfego e posições nas quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.	173
Tabela 34 – Valores médios de coesão e ângulo de atrito interno (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.	175
Tabela 35 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) com a densidade (D_s), porosidade total (P_t) e classes de tamanho de poros no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.	177

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

σ_p	Pressão de pré-consolidação
IHO	Intervalo hídrico ótimo
Mg	Megagrama
kPa	Quilopascal
kg	Quilograma
kg kg⁻¹	Quilograma por quilograma
%	Percentual
PA	Porosidade de aeração (% ou m ³ m ⁻³)
CC	Capacidade de campo (% ou m ³ m ⁻³)
PMP	Ponto de murcha permanente (% ou m ³ m ⁻³)
RP	Resistência do solo à penetração (MPa)
m³	Metro cúbido
m³ m⁻³	Metro cúbido por metro cúbido
MPa	Megapascal
IC	Índice de compressão
D_SMAX	Densidade máxima do solo (Mg m ⁻³)
U	Umidade gravimétrica do solo ou umidade em base de massa (% ou kg ¹ kg ⁻¹)
U_{OC}	Umidade gravimétrica ótima de compactação (% ou kg ¹ kg ⁻¹)
CRA	Curva de retenção de água no solo
σ_p	Pressão crítica para o crescimento de plantas
m	Metro
°C	Graus Celsius
mm	Milímetro
SXe	Planossolo Háptico Eutrófico
PVd	Argissolo Vermelho Distrófico
PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico
SXd	Planossolo Háptico Distrófico gleissólico
CXbd	Cambissolo Háptico Tb Distrófico
cm	Centímetro
g kg⁻¹	Gramas por quilograma
Mg m⁻³	Megagrama por metro cúbico
Argila	Partículas do solo de diâmetro menor que 0,002 mm

Silte	Partículas do solo de diâmetro entre 0,05 a 0,002 mm
Areia fina	Partículas do solo de diâmetro entre 0,2 a 0,05 mm
Areia grossa	Partículas do solo de diâmetro entre 2 a 0,2 mm
Cascalho	Partículas do solo de diâmetro entre 20 a 2 mm
C-org	Carbono orgânico do solo (g kg^{-1})
Dp	Densidade de partículas do solo (Mg m^{-3})
m²	Metro quadrado
m³ ha⁻¹	Metro cúbico por hectare
ha	Hectare
°	Graus
min	Minuto
s	Segundo
Ds	Densidade do solo (Mg m^{-3})
θ	Umidade volumétrica do solo ou umidade em base volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Ψ_m	Tensão de água no solo (kPa ou MPa)
exp	Exponencial
θ_{CC}	Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{PMP}	Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{RP}	Umidade volumétrica do solo em determinado valor de resistência à penetração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{PA}	Umidade volumétrica do solo em determinado valor de porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
D_{S_cIHO}	Densidade do solo crítica baseada no intervalo hídrico ótimo
$D_{S_cIHO_{RP2MPa}}$	Densidade do solo crítica baseada no intervalo hídrico ótimo considerando como limite crítico o valor de resistência do solo à penetração de 2 MPa
$D_{S_cIHO_{RP3MPa}}$	Densidade do solo crítica baseada no intervalo hídrico ótimo considerando como limite crítico o valor de resistência do solo à penetração de 3 MPa
AD	Conteúdo de água disponível ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_r	Umidade volumétrica do solo residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_s	Umidade volumétrica do solo em saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
D	Diâmetro de poro (μm)
μm	Micrometro
σ_t	Tensão superficial da água (kPa)

θ_0	Ângulo de contato considerando menisco e parede de tubo capilar (°)
LL	Limite de liquidez (kg kg^{-1})
LP	Limite de plasticidade (kg kg^{-1})
IP	Índice de plasticidade
GC	Grau de compactação (%)
ε	Índice de vazios
σ	Tensão normal (kPa)
PMC	Ponto de máxima curvatura
PI	Ponto de inflexão
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson
LS	Limite superior
LI	Limite inferior
QS	Quartil superior
QI	Quartil inferior
AI	Amplitude interquartílica
R^2	Coefficiente de determinação
$R^2 \text{ aj.}$	Coefficiente de determinação ajustado
S_{yx}	Erro padrão da estimativa
F	Valor de F calculado
N	Número de repetições
IHO_{MAX}	Valor em umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) na máxima amplitude do intervalo hídrico ótimo
θ_{OC}	Umidade volumétrica ótima de compactação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_{LL}	Umidade volumétrica correspondente ao limite de liquidez ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
θ_{LP}	Umidade volumétrica correspondente ao limite de plasticidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
cm h^{-1}	Centímetros por hora
h	Hora
DAP	Diâmetro à altura do peito (cm)
$\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$	Metro quadrado por hectare
hp	<i>Horse power</i>
kW	<i>Kilowatts</i>
psi	<i>Pound per square inch</i>
km h^{-1}	Quilometro por hora
km	Quilometro

P_c	Pressão rodado-solo (kPa)
W	Massa da máquina sobre o rodado (kg)
A	Área de contato rodado-solo (cm ²)
cm²	Centímetro quadrado
±	Desvio padrão
Mac	Macroporosidade, poros de diâmetro superior a 50 µm (m ³ m ⁻³)
Mic	Microporosidade, poros de diâmetro inferior a 50 µm (m ³ m ⁻³)
Ksat	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h ⁻¹)
mm h⁻¹	Milímetro por hora
Pt	Porosidade total (m ³ m ⁻³)
Ka	Permeabilidade do ar no solo (µm ²)
ρ	Densidade do ar (kg m ⁻³)
kg m⁻³	Quilograma por metro cúbico
gr	Aceleração da gravidade (m s ⁻²)
m s⁻²	Metro por segundo quadrado
Δv	Volume de ar (m ³)
Δt	Intervalo de tempo (s)
L	Comprimento (m)
Δp	Pressão de ar aplicada (hPa)
hPa	Hectopascal
Am	Área da amostra (m ²)
DS_{ref}	Densidade de referência do solo obtido em laboratório (Mg m ⁻³)
mm min⁻¹	Milímetro por minuto
τ	Tensão cisalhante (kPa)
φ	Ângulo de atrito interno (°)
c	Coesão do solo (kPa)
kg m⁻²	Quilograma por metro quadrado
P_{Ø50-30}	Poros com diâmetro entre 50 a 30 µm (m ³ m ⁻³)
P_{Ø30-10}	Poros com diâmetro entre 30 a 10 µm (m ³ m ⁻³)
P_{Ø10-3}	Poros com diâmetro entre 10 a 3 µm (m ³ m ⁻³)
P_{Ø<3}	Poros com diâmetro inferior a 3 µm (m ³ m ⁻³)
Ln	Logaritmo natural
Log₁₀	Logaritmo em base dez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Hipóteses	3
1.2 Objetivos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Colheita florestal	5
2.1.1 Mecanização das operações de colheita florestal	5
2.1.2 Principais máquinas, equipamentos e sistemas de colheita florestal.....	6
2.2 Compactação do solo devido à colheita florestal mecanizada	8
2.2.1 Efeitos da compactação sobre o ecossistema	8
2.2.3 Fatores influentes na compactação do solo	11
2.2.3.1 Características da atividade de colheita florestal.....	11
2.2.3.2 Características do sítio florestal.....	14
2.2.4 Alternativas para minimização da compactação do solo.....	19
2.3 Indicadores de trafegabilidade do solo	21
3 ESTUDO I - QUALIDADE FÍSICA, TRAFEGABILIDADE E PRESSÕES CRÍTICAS DE SOLOS DE USO FLORESTAL	24
3.1 Introdução.....	24
3.2 Material e métodos	25
3.2.1 Caracterização das áreas de estudo.....	25
3.2.1.1 Localização, clima e aspectos geológicos	25
3.2.1.2 Histórico e solos	27
3.2.2. Procedimento amostral	27
3.2.3 Determinações	30
3.2.3.1 Granulometria, carbono orgânico e densidade de partículas.....	30
3.2.3.2 Intervalo hídrico ótimo	30
3.2.3.3 Conteúdo de água disponível, curva de retenção de água e distribuição de poros	32
3.2.3.4 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e limites de consistência	32
3.2.3.5 Grau de compactação.....	33
3.2.3.6 Pressão de pré-consolidação e índice de compressão.....	33
3.2.3.7 Estimativa da pressão crítica para o crescimento de plantas	35
3.2.3.8 Relações entre variáveis e desenvolvimento de pedofunções	35
3.3 Resultados e discussão	36
3.3.1. Caracterização dos solos estudados.....	36

3.3.2. Indicadores de qualidade física do solo	38
3.3.2.1 Intervalo hídrico ótimo	38
3.3.2.2 Indicadores de qualidade física e estado de compactação do solo	53
3.3.3. Indicadores de trafegabilidade do solo	72
3.3.3.1 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e limites de consistência	72
3.3.3.2 Relação grau de compactação e densidade crítica do solo	82
3.3.3.3 Capacidade de suporte, susceptibilidade à compactação, compressibilidade do solo e pressões críticas para o crescimento de plantas	84
3.3.3.3.1 Relação entre capacidade de suporte, atributos físicos e estados de compactação do solo.....	87
3.3.3.3.2 Relação entre susceptibilidade e atributos físicos do solo.....	98
3.3.3.3.3 Susceptibilidade, compressibilidade e estados de compactação do solo.....	102
3.3.3.3.4 Estimativa de pressões críticas para o crescimento de plantas.....	110
3.4 Conclusões.....	117
4 ESTUDO II - FLUXOS DE ÁGUA, AR E DEFORMAÇÃO DO SOLO APÓS TRÁFEGO DE HARVESTER E FORWARDER EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus saligna</i> Smith .	119
4.1 Introdução.....	119
4.2 Material e métodos	121
4.2.1 Caracterização da área de estudo.....	121
4.2.1.1 Localização e clima	121
4.2.1.2 Histórico, solo e povoamento florestal	121
4.2.1.3 Sistema de colheita da madeira	122
4.2.2. Procedimento amostral e coleta de dados.....	124
4.2.3 Determinações	127
4.2.3.1 Área de contato, pressão exercida pelas máquinas sobre o solo e camada de resíduos.....	127
4.2.3.2 Densidade, distribuição de poros, condutividade hidráulica. curva de retenção de água e conteúdo de água disponível	129
4.2.3.3 Permeabilidade do solo ao ar.....	130
4.2.3.4 Compressibilidade	131
4.2.3.6 Resistência do solo ao cisalhamento	132
4.2.3.7 Resistência do solo à penetração	133
4.2.4 Análises dos dados	134
4.3 Resultados e discussão	134
4.3.1. Área de contato, pressão das máquinas sobre o solo e camada de resíduos.....	134
4.3.2. Densidade do solo e distribuição do tamanho de poros	138
4.3.3. Curva de retenção, disponibilidade de água e condutividade hidráulica do solo saturado.....	145

4.3.4. Permeabilidade do solo ao ar.....	153
4.3.5. Resistência do solo à penetração	159
4.3.6. Intervalo hídrico ótimo	164
4.3.7. Pressão de pré-consolidação, índice de compressão e comportamento compressivo do solo	166
4.3.8. Grau de compactação do solo.....	171
4.3.8. Resistência do solo ao cisalhamento	174
4.4 Conclusões.....	178
5 CONCLUSÕES GERAIS	179
6 RECOMENDAÇÕES.....	180
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	182
8 ANEXOS	200

1 INTRODUÇÃO GERAL

O processo de mecanização impulsionou a produtividade e a qualidade das atividades realizadas para o cultivo das florestas, possibilitando, também, a redução dos custos de produção. 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, em operações de colheita da madeira.

A compactação ocorre quando forças mecânicas impostas pelo tráfego de máquinas são superiores à capacidade de suporte do solo, modificando a estrutura e o arranjo dos agregados, havendo aproximação das partículas, o que gera redução do volume ocupado por poros, e incremento da densidade e resistência mecânica (REICHERT et al., 2010). Conseqüentemente, com a diminuição do tamanho dos poros, a condutividade hidráulica é reduzida, o que diminui a infiltração e o movimento de água (DICKERSON, 1976), aumentando a susceptibilidade do solo à erosão, reduzindo a capacidade de aeração e resultando em impedimento ao crescimento e atividade das raízes das plantas, entre outras alterações no ecossistema (GREACEN; SANDS, 1980). Na literatura, há muitos trabalhos sobre a compactação do solo em função do uso de máquinas agrícolas. Porém, do ponto de vista florestal, a situação difere bastante das explorações agrícolas, uma vez que a quantidade de trabalhos especificamente nessa linha de pesquisa é bem menor.

Em solos florestais, o processo de compactação apresenta uma dinâmica física diferente do que é observado em outros sistemas de manejo, pois, em distinção das pastagens e lavouras, as árvores apresentam ciclos longos, sendo sujeitas a variações climáticas durante vários anos, com suas raízes impondo forças mecânicas sobre o solo. Além disso, há o crescente emprego de máquinas maiores e mais pesadas nas operações de colheita da madeira, as quais trafegam indiscriminadamente e sem controle em condições inadequadas de umidade. Isso, em conjunto com o aumento do peso e da quantidade das cargas transportadas, mais a derrubada, processamento e extração de grandes árvores, contribui para que a amplitude do problema de compactação em áreas florestais seja maior.

A pressão de pré-consolidação (σ_p), definida como a pressão máxima que o solo suportou no passado, e o intervalo hídrico ótimo (IHO), definido como a faixa de conteúdo de água do solo menos limitante ao crescimento das plantas, são dois indicadores frequentemente utilizados para avaliar a condição físico-mecânica dos solos. A σ_p tem sido utilizada como indicador da trafegabilidade, uma vez que a aplicação de pressões maiores que esse valor leva

à compactação adicional e deformação da estrutura do solo, havendo, em consequência, alterações de outras propriedades, principalmente, aquelas ligadas aos fluxos de água e ar. O IHO vem sendo utilizado como um dos principais e mais importantes indicadores da qualidade física estrutural do solo para o desenvolvimento de plantas, pois tem como característica a integração em um só índice dos principais fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento de plantas.

Vários autores têm demonstrado que a deterioração do solo, em decorrência do tráfego de máquinas, altera esses dois indicadores supramencionados. Tanto a σ_p como o IHO são relacionados às outras propriedades como a densidade, porosidade, resistência mecânica, umidade, composição textural e conteúdo de carbono orgânico do solo, e, portanto, a alteração de um desses indicadores (σ_p) induz à alteração do outro (IHO).

Embora esse tema tenha relevância expressiva, há carência de pesquisas que relacionem os indicadores de trafegabilidade e qualidade física dos solos com o crescimento das plantas, especialmente, quando consideradas as áreas florestais. Além disso, outro fator que tem limitado o uso e aplicação desses indicadores é a necessidade de ensaios laboratoriais com equipamentos específicos, demandando longos períodos de tempo, trazendo custos relativamente elevados. Uma alternativa que visa a minimizar o problema e busca ampliar a utilidade desses indicadores é o desenvolvimento de funções matemáticas que permitam estimar tais indicadores, a partir de propriedades e atributos do solo, facilmente mensuráveis e de baixo custo.

A busca pelo melhor entendimento do processo de compactação e o desenvolvimento de pedofunções para estimativa da qualidade física e trafegabilidade dos solos possibilitará nortear o planejamento das operações florestais mecanizadas, procurando diminuir a possibilidade de perdas de produção acarretadas pela degradação dos solos, em função do tráfego de maquinário e subsidiando a tomada de decisão para a manutenção da sustentabilidade florestal.

Visando a alçar tais proposições, a presente pesquisa foi dividida em dois estudos, sendo o objetivo do primeiro estudo versado na determinação de indicadores de qualidade física e trafegabilidade de cinco solos de uso florestal, nos quais foi avaliada a influência de diferentes estados de compactação e de atributos texturais sobre estes indicadores, relacionando-os, e, dessa forma, estimando a pressão crítica que pode ser aplicada a esses solos, a qual não resultará em compactação adicional e condições restritivas ao crescimento de plantas. O segundo estudo foi desenvolvido no intuito de avaliar os efeitos da intensidade

de tráfego de máquinas de colheita da madeira, *Harvester* e *Forwarder*, sobre os fluxos de água, ar e deformação de um solo de uso florestal.

1.1 Hipóteses

A qualidade física, relacionada diretamente às propriedades físico-hídricas dos solos, e a trafegabilidade, relacionada diretamente com as propriedades mecânicas, variam em função do tipo e estado de compactação do solo.

A alteração de qualquer propriedade física do solo, como a capacidade de suporte, por exemplo, reflete na alteração de outra, como o intervalo hídrico ótimo. Dessa forma, os indicadores de qualidade física e trafegabilidade se relacionam e podem ser estimados através de propriedades e atributos do solo por meio de funções matemáticas.

O intenso tráfego de máquinas de grande porte na colheita da madeira impõe grandes pressões sobre o solo, alterando as suas propriedades físico-mecânicas e refletindo nos fluxos de água e ar. Essas alterações repercutem no aumento da exigência de tração das máquinas, ocasionando maior deformação do solo, o que pode afetar áreas além das trilhas de passagem das máquinas na colheita florestal.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a qualidade física, trafegabilidade e a compactação de solos em função do tráfego de máquinas de colheita da madeira de *Eucalyptus* sp. e desenvolver funções matemáticas para estimativa de propriedades físicas e mecânicas, visando a subsidiar o planejamento das operações e minimizar a degradação de sítios florestais. Para esse fim, especificamente, objetivou-se:

- 1) Determinar os indicadores de qualidade física e indicadores de trafegabilidade de cinco solos florestais e avaliar a influência de outras propriedades e atributos físicos nesses indicadores;
- 2) Desenvolver funções matemáticas para estimativa dos indicadores de qualidade física e trafegabilidade;
- 3) Relacionar os indicadores de qualidade física e trafegabilidade e estimar a pressão crítica que pode ser aplicada a cinco solos florestais, a qual não resultará em condições restritivas ao crescimento de plantas e compactação adicional;

- 4) Avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas de colheita de madeira sobre a deformação e fluxos de água e ar de um solo de uso florestal.

Com o intuito de alcançar tais objetivos, a pesquisa foi desenvolvida por meio de dois diferentes estudos, os quais são apresentados a seguir. O primeiro estudo teve seu desenvolvimento versado em atender aos objetivos 1, 2 e 3; enquanto o segundo estudo teve o propósito principal de atender ao objetivo 4.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Colheita florestal

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 (TANAKA, 1986).

A colheita e o transporte da madeira são considerados as operações mais importantes do setor florestal, principalmente em termos econômicos, podendo representar mais de 50 % dos custos da madeira posta no pátio da indústria (MACHADO; LOPES, 2000). Além da relevância econômica, essas operações causam impactos no ecossistema, como a exportação de nutrientes, compactação do solo, alterações na quantidade e qualidade da água, susceptibilidade ao fogo, impactos sobre a vida silvestre e alterações estéticas da paisagem (SEIXAS, 1997; SEIXAS; MAGRO, 1998; FREITAS et al., 2007).

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).

2.1.1 Mecanização das operações de colheita florestal

No Brasil, durante muitos anos, as operações de colheita da madeira dependeram da utilização de máquinas adaptadas do setor agrícola e industrial para a execução das atividades. Nesse período, os sistemas manuais e semimecanizados foram amplamente utilizados por falta de outras opções, envolvendo grande contingente de mão-de-obra, tornando as operações onerosas e de alto risco. No entanto, com a abertura do mercado à importação em 1994, muitas empresas florestais iniciaram a mecanização da colheita de madeira de forma intensiva (Figura 1), uma vez que houve crescimento da demanda por produtos florestais, aumento no custo da mão-de-obra, necessidade de execução de trabalho de modo mais ergonômico, necessidade de maior eficiência das operações e busca por diminuição dos custos de produção (MACHADO, 2008).



Figura 1 – Evolução da colheita de madeira, partindo do uso de motosserras (a) e tratores agrícolas adaptados (b) para tratores florestais como *Feller Bunchers* (c), *Skidders* (d) e *Forwarders* (e). Fontes: arquivo pessoal, www.deere.com.

Embora a mecanização dos sistemas de colheita da madeira tenha gerado grandes benefícios em termos de produtividade, redução de custos, maior segurança e ergonomia aos operadores (MACHADO, 2008), o uso de máquinas de grande porte que, em geral ultrapassam 20 Mg de peso e que trafegam intensamente sobre as áreas, vem ocasionando impactos ambientais, principalmente em termos de compactação do solo, provocando alterações significativas nas características físicas, químicas e biológicas do solo, além de afetar o seu potencial produtivo (DIAS JÚNIOR, 1999; AMPOORTER, 2011).

2.1.2 Principais máquinas, equipamentos e sistemas de colheita florestal

Atualmente, no país, o setor de colheita florestal apresenta grande variedade de máquinas e equipamentos disponíveis com múltiplos propósitos para o desenvolvimento das diversas atividades que o compõem (MACHADO, 2008), sendo as principais máquinas utilizadas:

a) **Harvester:** trator florestal que realiza, simultaneamente, as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento, destopamento, 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 Mg, 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 semiesteiras, possuindo chassi articulado com uma dobradiça central e podendo ser 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*).

As principais máquinas e equipamentos utilizados na colheita florestal foram desenvolvidos basicamente para dois sistemas: o primeiro, correspondente aos países escandinavos, está 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 de toras na forma de baldeio. O segundo corresponde aos países da América do Norte, voltado para o sistema de Árvores Inteiras (*Full-tree*), em que o *Feller Buncher* realiza a derrubada e o empilhamento de feixes das árvores, o *Skidder* realiza a extração na forma de arraste das árvores e os processadores florestais executam o processamento das árvores em toras (MELLO, 1997).

Um sistema de colheita da madeira compreende um 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 (SEIXAS, 1985), podendo ser classificados os principais sistemas de colheita, de acordo com Machado (2008), como:

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 variável 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, os quais são levados para um pátio de estocagem ou diretamente para a indústria.

2.2 Compactação do solo devido à colheita florestal mecanizada

A compactação é um problema que envolve interações entre propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como também do clima, das práticas culturais e do tipo de cultivo (ADUR, 1990). Além da expressão compactação, vários autores citam adensamento e compressão para definirem um estado de compactação do solo. Entretanto, distinções podem ser feitas, uma vez que o adensamento é relacionado, geralmente, ao processo onde ocorre redução natural do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química (CURI et al., 1993), enquanto a compressão pode ser relacionada à 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 (ROLOFF, 1986). Por fim, o termo compactação é relacionado ao resultado de ação antrópica, principalmente, pelo tráfego de máquinas em que ocorrem alterações estruturais no solo com redução na sua porosidade (REICHERT et al., 2007).

2.2.1 Efeitos da compactação sobre o ecossistema

A compactação do solo, independentemente do tipo, uso e manejo, altera significativamente as condições físicas do solo (densidade, porosidade total, tamanho e

continuidade dos poros) e suas propriedades dependentes (aeração, infiltração, retenção e capacidade de armazenamento de água) (LIMA; SIRTOLI, 2006). 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 o solo e a atmosfera, reduzindo os níveis de oxigênio necessários para a manutenção da microfauna e flora edáfica (SILVEIRA, 2001).

Problemas relacionados à aeração são resultantes de mudanças na estrutura do solo, tendo como causa o realinhamento e a destruição, principalmente, de macroporos. Em solos adequadamente aerados, os gases movem-se por difusão ou fluxo de massa como resultado de flutuações diurnas da temperatura, mudanças na pressão barométrica ou movimento horizontal da água. A difusão ou movimento de gases na atmosfera do solo podem ser facilmente interrompidos pela alteração da estrutura do solo nos horizontes superficiais (RUARK et al., 1982). A diminuição no espaço macroporoso devido à compactação pode restringir a difusão de CO_2 para fora do solo e a entrada de O_2 (STARTSEV; McNABB, 2009). Ampoorter et al. (2010) relatam que poucas passadas de máquinas florestais já resultam em aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) no solo.

O aumento na proporção de microporos pela compactação pode fazer com que o solo apresente comportamento de como se tivesse textura fina, e, dessa forma, a umidade volumétrica na capacidade de campo pode aumentar, crescendo, assim, o volume de água por unidade de volume de solo que está disponível às raízes das árvores (SANDS et al., 1979). Porém, apesar do aumento do volume de água na capacidade de campo, geralmente não há aumento do crescimento das plantas devido aos efeitos adversos na estrutura e aeração (OHU et al., 1985). Hill e Summer (1967) 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 a umidade volumétrica na capacidade de campo se torna menor.

O efeito da compactação na condutividade hidráulica e na infiltração pode ser estimado 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 et al., 2007). Porém, devido ao fato da compactação aumentar a proporção de microporos, a redução da condutividade hidráulica não-saturada é menos evidente que a saturada, podendo, até, ocorrer um aumento na primeira (SANDS et al., 1979).

Outro efeito direto da redução da infiltração de água no solo se refere à erosão hídrica. Alterações associadas ao fluxo de água em solos compactados podem aumentar o escoamento

superficial, tornando, assim, o solo susceptível à erosão e reduzindo o armazenamento de água no solo (CONSTANTINI et al., 1997).

A compactação do solo também pode gerar efeitos quanto à forma de disponibilidade dos nutrientes no solo para as plantas, podendo ser tanto de maneira benéfica como o contrário. Lipiec e Stepniewski (1995) verificaram que a compactação acarreta em perdas de nitrogênio para a água subsuperficial e para a atmosfera. Horn et al. (1995) constataram que alterações nos fluxos do solo causaram aumento na formação de N_2O e impediram a troca de gases com a atmosfera. Silva et al. (2002) observaram que a compactação do solo restringiu o crescimento e aumentou o diâmetro médio de raízes de eucalipto, além de ocasionar redução do acúmulo de potássio na planta, diminuindo a eficiência da adubação potássica. Outros estudos relacionaram a compactação com a diminuição do pH e teor de fósforo do solo, e aumento do teor de alumínio livre, fazendo com que o solo se torne mais ácido ao longo do tempo (SILVEIRA, 2001).

Em consequência aos efeitos adversos no meio abiótico resultantes da compactação, o desenvolvimento de plantas e organismos da fauna pode ser afetado, induzindo a uma redução da diversidade e funcionalidade do ecossistema. Fernandez et al. (1995) observaram que os danos no solo, ocasionados por máquinas de extração de madeira, apresentaram efeitos negativos sobre a produtividade de *Pinus taeda* aos quatro anos de idade. Ao avaliarem o crescimento de árvores em solos compactados, devido ao tráfego de máquinas florestais, Worrel e Hampson (1997) constataram que o crescimento em altura foi reduzido de 13 a 50 % e o volume na ordem de 10 a 20 %. Smith (2003) relata que a compactação afetou significativamente o crescimento de *Eucalyptus grandis* (15,5 %), *grandis x camaldulensis* (12,3 %) e *grandis x urophylla* (16,2 %).

A compactação começa afetando o crescimento radicular, com consequências para a parte aérea e produtividade, e mesmo em condições de acidez adequada e boa adubação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, pois a taxa de absorção de nutrientes pelas raízes cai. Também, há a diminuição do espaço poroso, reduzindo a quantidade de oxigênio disponível e limitando, assim, o desempenho de processos metabólicos das plantas (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

Além disso, a compactação pode reduzir a macroporosidade em níveis que o crescimento ou mesmo a sobrevivência das raízes é determinada pela disponibilidade de O_2 quando o solo está úmido. Isso ocorre quando a necessidade de O_2 para a respiração no solo excede a razão pela qual o oxigênio no ar do solo pode ser repostado pela atmosfera (GREACEN; SANDS, 1980). Teepe et al. (2003) constataram que a compactação pode

implicar em uma redução da porosidade total em 20 % e em uma diminuição de 50 a 60 % na quantidade de macroporos em favor dos pequenos poros. Heilman (1981) 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 expandir-se-á somente se for capaz de exercer suficiente pressão para dilatar o poro. Junto a isso, o impedimento no crescimento da raiz principal em solo compactado faz com que as plantas expandam as raízes laterais (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Mósena e Dillenburg (2004) verificaram alterações na morfologia da raiz de *Araucaria angustifolia*, com raízes superficiais e laterais finas e comprimento reduzido. Silva et al. (2002a) detectaram redução da produção de matéria seca de raízes e densidade radicular de *Eucalyptus urophylla* pela compactação em condições de vaso com diferentes solos.

A fauna do solo pode sofrer danos físicos, sua movimentação pode ser impedida e sua aeração comprometida (menor disponibilidade de O₂) como resultado da compactação (SAUTTER, 2001; AMPOORTER, 2011). Sautter (2001) verificou que, mesmo com baixos níveis de compactação, houve diminuição da população de bactérias, fungos e mesofauna edáfica do solo. Os resultados de Schnurr-Pütz et al. (2006) revelaram que a compactação diminuiu a aeração favorecendo a ocorrência de organismos procariontes, os quais vivem em condições anaeróbicas.

2.2.3 Fatores influentes na compactação do solo

2.2.3.1 Características da atividade de colheita florestal

As diferentes composições de máquinas empregadas ou sistemas de colheita adotados causam diferentes níveis de impactos no solo devido às características das máquinas em si e também pela forma como a madeira é cortada, extraída e processada. Lanford e Stokes (1995) observaram que um sistema com *Skidder* causou 50 % mais perturbações no solo do que um sistema com *Forwarder*. Nesse sentido, Fenner (2008) cita que, geralmente, o tráfego de módulos compostos por *Feller Buncher* e *Skidder* afeta praticamente toda a área do talhão, sendo o solo trafegado pelo menos uma vez, enquanto o tráfego de módulos com *Harvester* e *Forwarder* fica concentrado nos ramais de extração. Em concordância, Dias Júnior et al. (2003) citam que as operações de colheita com *Harvester* e *Forwarder* podem causar maior degradação da estrutura do solo; contudo, os impactos são sistemáticos, abrangendo posições

definidas e menor área, enquanto os impactos no solo causados pela colheita com *Feller Buncher* e *Skidder* não são sistemáticos, tendo distribuição aleatória e abrangendo maior área.

O sistema de colheita a ser empregado e, conseqüentemente, quais máquinas, equipamentos e mão-de-obra a serem utilizados, como também a frequência e a área trafegada, dependem diretamente do tipo de floresta e seu manejo. O tráfego na atividade de colheita pode ser diferenciado em função de florestas nativas ou de reflorestamentos, que, por sua vez, podem ter diferentes tipos de manejo. Como exemplo, podem ser citados os reflorestamentos de *Eucalyptus* sp., que, em geral, possuem rotação de sete anos e, se conduzida a brotação (sistema de manejo por talhadia), pode estender-se a 14 ou até 21 anos, havendo tráfego para colheita no final de cada rotação. Como outro exemplo, para *Pinus* sp. as rotações variam de 11 a 30 anos, podendo haver vários desbastes até o corte raso da floresta (FENNER, 2008).

Com a tendência do uso de máquinas de maior porte que cortam, processam e transportam maiores volumes de madeira, o aumento do peso das máquinas e da pressão aplicada sobre o solo são outros fatores que têm influenciado no nível de compactação causado. A distribuição da pressão no solo sob as rodas de máquinas depende de fatores como: a) peso da máquina, 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 água e densidade inicial do solo (capacidade de suporte) (SÖHNE, 1958). Dessa forma, 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, fato esse, devido à esteira ter maior área de contato com o solo, exercendo menor pressão por unidade de área e causando menor compactação (LIMA; SIRTOLI, 2006).

A pressão aplicada pelos rodados na superfície distribui-se no perfil do solo de forma radial e a profundidade de dissipação dessa pressão é inversamente proporcional à resistência do solo (Figura 2). Se o solo possuir alta capacidade de suporte, provavelmente, a pressão dissipar-se-á nas camadas superficiais do solo, mas caso este apresente baixa capacidade de suporte, como condição após revolvimento ou em alta umidade, as pressões aprofundam-se mais, conforme a menor resistência do solo, agravando-se pelo corte e formação de sulcos no solo em função dos rodados (REICHERT et al., 2010).

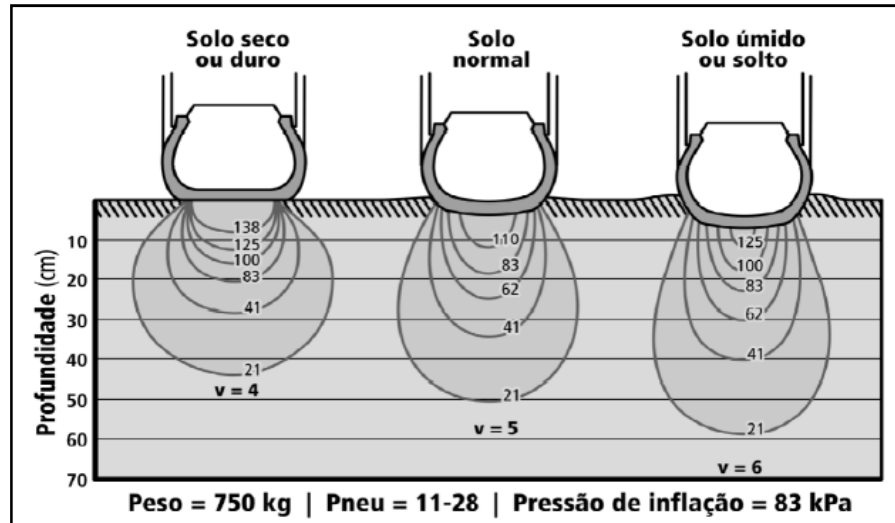


Figura 2 – Pressão no solo em função de sua capacidade de suporte ou resistência, em condições padronizadas de peso da máquina e pressão de inflação dos pneus. Fonte: Adaptado de Söhne (1958).

Na avaliação da distribuição da pressão, deve ser considerado que a real pressão exercida pelas máquinas sobre o solo (pressão dinâmica), muitas vezes, difere da pressão teórica que é calculada com base na área de contato entre pneu-solo (pressão estática), principalmente quando as máquinas estão trafegando ou realizando a operação de derrubada e processamento das árvores (AMPOORTER, 2011). Além disso, dependendo da forma como realizam seu trabalho, os eixos das máquinas de colheita podem exercer diferentes pressões no solo, como demonstrado por Seixas (2000), o qual observou que, geralmente, o eixo traseiro das máquinas de extração suporta maior carga do que o frontal, fato este que resultou em uma estimativa de pressão de aproximadamente 26 kPa sob os pneus dianteiros e cerca de 80 kPa sob os pneus traseiros, na operação de um *Skidder* com 6,5 Mg de carga máxima. Outros relatos, como os de Horn et al. (2004), indicaram que a pressão aplicada sobre o solo por tratores florestais de colheita pode chegar em torno de 400 kPa.

A pressão aplicada no solo varia também em função do tipo, tamanho e pressão de inflação dos rodados (pneus) (SOANE et al., 1981). Operações de colheita com *Skidders* com pneus largos em áreas com alta umidade causaram compactação, havendo alterações como redução da drenagem e aeração do solo, contudo, em níveis menores quando comparados com a mesma máquina equipada com pneus estreitos. Pneus mais largos distribuem o peso da máquina sobre maior superfície de contato, resultando, assim, em menor pressão no solo (SEIXAS, 1997). Em condições de mesmo peso da máquina, o nível de compactação sofrido pelo solo ficou, negativamente, correlacionado com o número de rodados (ALAKUKKU et

al., 2003) e dimensão dos pneus (BENTHAUS; MATTHIES, 1993); e, positivamente, correlacionado com a pressão de inflação dos pneus (ABU-HAMDEH et al., 2000).

Em relação ao benefício do uso de esteiras, conclusões gerais ainda não podem ser dadas (ALAKUKKU et al., 2003; SHERIDAN, 2003). Bygdén et al. (2004) afirmam que o uso de máquinas com rodados de semiesteiras ou esteiras, reduzem de forma significativa a compactação, permitindo, ainda, à máquina acessar áreas declivosas, onde rodado de pneus em certas ocasiões não é capaz de acessar. Em contraste, Lopes et al. (2011) constataram que não houve alteração significativa nas propriedades físicas de um Latossolo, devido ao tráfego do *Skidder* com diferentes tipos de rodados, mostrando que a instalação de semiesteiras nos rodados das máquinas não acarretou em redução da compactação do solo, somente contribuindo para a melhoria da tração.

Em geral, a distribuição da compactação no perfil do solo ocorre de acordo com a carga aplicada, a pressão exercida pelos rodados das máquinas, o conteúdo de água do solo e a intensidade de tráfego recebida (RAPER; ERBACH, 1990). O efeito da intensidade de tráfego já foi comprovado em muitos estudos, os quais constataram que o tráfego repetido em uma mesma área provoca danos à estrutura do solo, sendo que, em geral, a primeira passada é considerada aquela que induz as maiores mudanças (SEIXAS; SOUZA, 2007; SILVA et al., 2008; AMPOORTER et al., 2007).

Grande parte disso é devido às primeiras passadas das máquinas, em geral, exercerem pressões no solo superiores à capacidade de suporte, afetando a estrutura e, conseqüentemente, o espaço poroso (HORN et al., 2007). Como os poros se tornam menores devido à compactação, estes acabam exercendo maior resistência ao solo em relação à compactação adicional, aumentando a resistência do solo e, conseqüentemente, aumentando a capacidade de suporte (WILLIAMSON; NEILSEN, 2000). Assim, as passadas seguintes terão menor efeito sobre a estrutura do solo, causando menor compactação, ocorrendo isso até quando as pressões aplicadas não conseguirem mais exceder a aumentada constantemente capacidade de suporte.

2.2.3.2 Características do sítio florestal

No processo de compactação, o número de partículas por unidade de volume e a sua distribuição espacial afetam diretamente a resistência e susceptibilidade do solo à compactação. O número de partículas, a movimentação e/ou deslocamento destas, após a aplicação de uma força, será determinada pela sua quantidade, isto é, havendo mais partículas,

as forças entre os pontos de contato das partículas serão menores. Quanto à distribuição espacial das partículas, estas podem estar distribuídas uniformemente no espaço ou podem estar agregadas, alternando com espaços vazios. Caso estejam agregadas e alternando com espaços vazios, as tensões concentram-se nas áreas mais densas e mais resistentes, pois os espaços vazios tornam o solo menos resistente. Além disso, outra característica importante na resistência do solo é a orientação das partículas, pois elas nem sempre se apresentam aleatórias e, se ocorrem em orientação paralela (tipo lâmina), geralmente, trazem maior resistência ao solo (REICHERT et al., 2010).

Tendo esses pressupostos definidos, pode-se inferir que solos com diferentes composições texturais certamente apresentarão comportamento distinto, quanto às suas propriedades físicas e, logicamente, quando submetidos ao processo de compactação. Desse modo, supõe-se que os efeitos do tráfego de máquinas serão mais pronunciados em solos de textura argilosa do que em solos de textura arenosa (FISHER; BINKLEY, 2000; SMITH et al., 1997a). Em solos de textura grosseira (arenosos), o atrito entre as partículas é maior, dificultando a movimentação dessas (LIMA, 2004). Em solos formados por partículas de diferentes tamanhos, as menores podem deslocar-se e encaixar-se nos espaços formados entre as partículas maiores, fazendo que esses solos, de forma geral, sejam mais facilmente compactados (TORRES; SARAIVA, 1999).

A maior susceptibilidade dos solos à compactação, conforme o decréscimo do tamanho das partículas foi confirmado por Seixas e Oliveira Júnior (2001), que constataram maiores impactos da colheita florestal mecanizada sobre solos argilosos em comparação a solos arenosos, à semelhança do relatado por Gomez et al. (2002).

Além da textura, outro fator determinante sobre o comportamento do solo em relação à compactação é a umidade. A umidade é o principal fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo (DIAS JÚNIOR, 1994), ou seja, é o principal agente que determina a resistência à compactação e o comportamento mecânico do solo frente às pressões exercidas pelo tráfego de máquinas.

No solo, a água atua como lubrificante entre as partículas, permitindo e favorecendo o descolamento das mesmas, e alterando o estado de consistência conforme maior for seu conteúdo (Figura 3). A consistência do solo é a manifestação das forças físicas de coesão entre as partículas e de adesão entre as partículas e outros materiais, conforme variação da umidade, sendo uma propriedade mais fácil de ser percebida do que descrita quantitativamente (REICHERT et al., 2010).

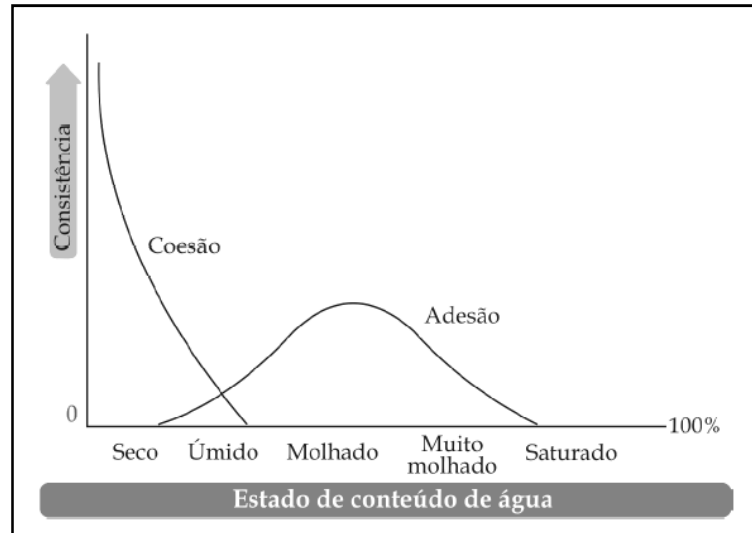


Figura 3 – Estados de consistência do solo em função do conteúdo de água. Fonte: Reichert et al. (2010).

Em baixa umidade (seco), o solo possui alta capacidade de suporte, pois apresenta propriedades de um sólido e, assim, sua moldabilidade é quase nula. Nessa condição, a água forma pequenos filmes ao redor das partículas, havendo atuação predominante de forças de coesão, que diminuem com o aumento do conteúdo de água. Em condição úmida, a capacidade de suporte do solo diminui, e este pode ser moldado, apresentando comportamento friável. Com o aumento gradual da condição úmida para a condição molhada, as partículas do solo ficam envolvidas por filmes de água cada vez mais espessos e, dessa forma, o deslizamento entre partículas é facilitado, fazendo com que o solo tenha comportamento plástico e baixa capacidade de suporte. Ao final, se o processo continuar, todos os poros e partículas do solo estarão preenchidos e envoltos por água, e, com isso, o solo passará de um estado plástico para um estado pastoso e de pastoso para fluído, sendo a capacidade de suporte reduzida para muito baixa a nenhuma (GREACEN; SANDS, 1980; HILLEL, 1998; AL-SHAYEA, 2001; REICHERT et al., 2010).

Essas relações são significativas apenas para solos com conteúdo de argila suficiente para permitir que a atração molecular (coesão) seja efetiva, sendo a atração molecular menor em solos com predomínio de silte, e, em solos arenosos tal atração chega a ser pouco ou nada significativa. No caso destes últimos, a coesão é máxima quando o solo se encontra em umidade intermediária a alta, e, assim, a resistência à compactação aumenta. Em condições muito secas ou muito molhadas, a coesão entre as partículas é muito menor e, então, o solo se torna mais susceptível à compactação. Esse comportamento também pode ser explicado devido ao predomínio de macroporos nesses solos (principalmente arenosos) e, assim, a água

retida nos vazios é facilmente drenada pelas forças gravitacionais, mesmo com conteúdos elevados e, então, os poros ficam preenchidos com ar, tornando-se mais sujeitos à compactação (FISHER; BINKLEY, 2000; AMPOORTER, 2011).

Em geral, a compactação do solo será máxima, quando a umidade for crítica para esse processo, sendo esta próxima à capacidade de campo (REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009; REICHERT et al., 2010). Com o conteúdo de água acima da capacidade de campo, o aumento da umidade resultará em redução da densidade, podendo haver perda da estrutura original do solo (SEIXAS; OLIVEIRA JÚNIOR, 2001).

A capacidade de suporte é outro fator diretamente relacionado à trafegabilidade e vulnerabilidade do solo à compactação. Para melhor entendimento, no ponto de vista da física, o solo é considerado um meio poroso, não rígido, trifásico (composto pelas fases líquida, sólida e gasosa), formado por partículas que apresentam complexidade de forma, tamanho e estrutura mineralógica. Portanto, como qualquer outro material da natureza, o solo, quando submetido a uma pressão externa, tende a deformar-se, apresentando comportamento compressivo, respondendo diferentemente em função do manejo, tráfego aplicado e devido às suas características intrínsecas (físicas, químicas, biológicas, mineralógicas e morfológicas) e extrínsecas (relevo, pedregosidade e clima) (REICHERT et al., 2010).

A compressibilidade do solo é a sua resistência em diminuir seu volume quando submetido a certa pressão. Assim, devido ao seu comportamento compressivo, o solo possui um “banco de memórias de pressões”, isto é, tem armazenado em sua estrutura todo o histórico de pressões e processos naturais ao qual foi submetido no passado (HOLTZ et al, 2010). Por isso, em estudos de compressibilidade, há a possibilidade de análise deste histórico, sendo esta ferramenta amplamente utilizada para determinar a capacidade de suporte do solo (ROSA, 2007).

Por meio de ensaios de compressibilidade, como o teste de compressão uniaxial, avalia-se a redução de volume do solo sob a ação de cargas externas, ou seja, simula-se a pressão exercida pelo tráfego de máquinas e, dessa forma, obtém-se a curva de compressão do solo. Através da análise dessa curva, a qual relaciona o logaritmo da pressão externa aplicada ao solo com algum parâmetro ligado à estrutura do solo, como o índice de vazios ou densidade, obtém-se a pressão de pré-consolidação (σ_p), que é um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo e de sua trafegabilidade. A curva de compressão pode apresentar dois comportamentos distintos: linear ou curvilíneo (não-linear). Quando o solo não sofreu nenhuma aplicação prévia de pressão, seu comportamento é linear (Figura 4a) e a aplicação de

qualquer pressão resultará em deformações não-recuperáveis, refletindo as alterações em sua estrutura e expressando uma forma curvilínea (Figura 4b) (REICHERT et al., 2010).

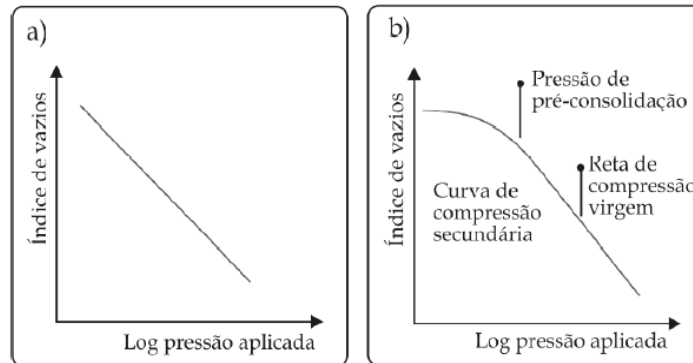


Figura 4 – Curva de compressão do solo quando não sofreu pressões prévias (a) e quando sofreu pressões prévias em seu histórico ou ação de processos naturais. Fonte: Reichert et al. (2010).

O comportamento compressivo do solo é dinâmico, sendo resultante das pressões externas aplicadas. Quando são aplicadas pressões externas superiores à capacidade de suporte do solo, ocorre a aproximação das partículas, havendo a redução do tamanho médio dos poros. Como os poros de menor dimensão tendem a ser menos propensos às forças compactantes, estes levam a uma maior resistência do solo e, dessa forma, a capacidade de suporte (pressão de pré-consolidação) é aumentada, o que, parcialmente, protege o solo de compactação adicional (WILLIAMSON; NEILSEN, 2000).

Em suma, no caso do solo sofrer pressões advindas de tráfego menores que a pressão de pré-consolidação, este reage de forma elástica e não há compactação adicional, ou seja, somente haverá compactação adicional do solo, caso as pressões impostas sejam superiores à pressão de pré-consolidação e, então, o solo apresentará comportamento plástico, havendo deformação e as propriedades físicas são alteradas (HORN et al., 2007).

A capacidade de suporte varia em função da distribuição do tamanho das partículas, tipo de argilomineral, conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, distribuição de raízes, densidade do solo, distribuição do tamanho e continuidade dos poros e, principalmente, umidade e, ou, tensão de água no solo. A uma mesma densidade do solo e a uma mesma tensão de água, a capacidade de suporte é menor, quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, a capacidade de suporte é menor, quanto menor a sua densidade. Quanto mais seco e compactado estiver o

solo, maior será sua capacidade de suporte, por estarem as partículas e/ou agregados mais coesos. Em solo úmido, a água atua como lubrificante entre as partículas, alterando seu estado de consistência e, conseqüentemente, reduzindo sua capacidade de suporte de carga (BRAIDA et al., 2010; REICHERT et al., 2010; AMPOORTER, 2011). Embora a capacidade de suporte seja variável, na agricultura, pecuária e silvicultura os valores de pressão de pré-consolidação têm sido inferiores a 300 kPa (REICHERT et al., 2010).

Assim, como a textura, a umidade e a capacidade de suporte, o conteúdo de matéria orgânica exerce considerável influencia no comportamento do solo. O incremento do conteúdo de matéria orgânica pode aumentar a trafegabilidade e resistência do solo à compactação, ou mesmo reduzir seus efeitos, devido ao aumento da coesividade, fazendo com que o limite de plasticidade seja maior. Com isso, há aumento no intervalo de umidade em que o solo pode sofrer tráfego, e, por conseguinte, dificultando o incremento de sua densidade e sua deformação, mesmo após pressões advindas de trânsito de máquinas (GREACEN; SANDS, 1980; ZHANG et al., 2005; BRAIDA, et al., 2006; REICHERT et al., 2010). A matéria orgânica também atua na formação e aumento da estabilidade de agregados, devido ao seu efeito de agregação dos constituintes minerais do solo (TISDALL; OADES, 1982). Essa estabilidade de agregados mantém as propriedades físicas do solo diante de fatores adversos, sobretudo em relação ao tráfego de máquinas (LEVY; MILLER, 1997).

Estratégias de manejo, como deixar os resíduos da colheita (galhos, folhas e cascas) sobre a área, podem promover a manutenção e o acúmulo da quantidade de matéria orgânica do solo e, portanto, consistir como importante medida visando à diminuição da compactação (REICHERT et al., 2007). Além de ajudar a manter e/ou aumentar o conteúdo de matéria orgânica do solo, os resíduos da colheita de madeira, se dispostos na área, contribuem para a distribuição das pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas sobre o solo, assim, influenciando no processo de compactação. Isso foi confirmado por Wronski (1990), que constatou que camadas de resíduos florestais proporcionaram redução significativa na formação de sulcos e um aumento na resistência do solo ao tráfego das máquinas, à semelhança do verificado nas pesquisas de Seixas et al. (1998) e Ampoorter et al. (2007).

2.2.4 Alternativas para minimização da compactação do solo

A possibilidade da colheita florestal mecanizada não causar danos estruturais e compactação do solo pode ser considerada quase nula. Por isso, é muito importante estabelecer alternativas que visem a minimizar ou a prevenir os efeitos nocivos da

compactação. Dentre as diversas alternativas para minimização da compactação, pode-se sugerir: 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 inflação, restrição de tráfego em áreas úmidas e tráfego sobre resíduos (SEIXAS et al, 1998; REICHERT et al., 2007).

Para Horn et al. (2004), 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. Outra solução seria o tráfego controlado de tal modo que se mantivesse maior área favorável para o crescimento das plantas, restringindo a compactação do solo para as faixas de trânsito (REICHERT et al., 2007). A restrição do tráfego de máquinas no interior do talhão, principalmente em condições de maior umidade, redução das trilhas de tráfego, tráfego sobre a galhada, transporte de menores cargas são medidas que procuram evitar a ocorrência dos distúrbios no solo (DIAS JÚNIOR et al., 2003; FENNER, 2008). Além disso, o uso de tratores com rodados de esteiras, pneus duplos, pneus de maiores dimensões e de baixa pressão interna de inflação e alta flutuação e rodados em tandem (LIMA et al., 2008), são outras alternativas que vêm sendo adotadas para minimizar o problema da compactação em solos florestais.

Alternativas usando a modelagem ou funções matemáticas para a estimativa da trafegabilidade dos solos estão se tornando cada vez mais promissoras. Funções que estimem a trafegabilidade do solo com base na pressão de pré-consolidação podem ser úteis na predição da máxima pressão que um solo pode suportar sob diferentes condições de umidade, sem causar compactação adicional, fornecendo, portanto, informações para a prevenção da compactação (DIAS JÚNIOR, 1994).

Existem outras alternativas de caráter preventivo, como a escolha de espécies com sistema radicular capaz de penetrar em solos compactados, aproveitamento de restos culturais e adubação orgânica, que melhoram a estrutura e aumentam o conteúdo de matéria orgânica do solo. Outras práticas consistem na realização das operações, preferencialmente, em épocas mais secas e no uso de métodos de preparo do solo, propiciando melhores condições para a implantação de mudas florestais (OLIVEIRA et al., 1998).

É fato que técnicas de revolvimento se mostram muito eficientes para reduzir a compactação, entretanto, sua utilização normalmente é de custo elevado e raramente são capazes de corrigir totalmente os efeitos negativos da compactação. Por isso, recomenda-se evitar a compactação através da minimização das pressões aplicadas sobre o solo, do que

periodicamente descompactá-lo, pois, caso sejam aplicadas pressões excessivas após feita a descompactação do solo, este, novamente, apresentará o problema de compactação, onerando os custos de produção (HÅKANSSON; REEDER, 1994).

2.3 Indicadores de trafegabilidade do solo

A trafegabilidade tem sido usada para caracterizar a capacidade de suporte do solo ao tráfego de máquinas, podendo ser definida como período em que o tráfego sobre o solo é possível sem causar compactação adicional ou danos estruturais, fornecendo desempenho e mobilidade adequados às máquinas (GREACEN; SANDS, 1980; CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991; DROOGERS et al., 1996).

Como mencionado anteriormente, a trafegabilidade ou capacidade de suporte do solo ao tráfego é fortemente governada pelas propriedades mecânicas do solo. Indicadores do estado mecânico do solo e do seu comportamento quando são aplicadas cargas podem advir de diversas propriedades, incluindo sua resistência ao cisalhamento e à penetração, densidade, limites de plasticidade e, principalmente, do índice de compressão e da pressão de pré-consolidação, a maioria das quais são fortemente dependentes da umidade e, dessa maneira, do estado de consistência do solo (EARL, 1997; DIAS JÚNIOR et al., 2008; REICHERT et al., 2010).

A predição da trafegabilidade do solo por meio de várias propriedades, atributos e métodos tem sido o alvo de diversas pesquisas (EARL, 1997). Porém, poucas dessas buscaram relacionar os métodos, propriedades ou atributos do solo com o crescimento de plantas (WÄSTERLUND, 1994). O comportamento do solo quando forças externas são nele aplicadas e as consequentes alterações na estrutura, são fenômenos de elevada complexidade, envolvendo a atuação de diversos fatores e efeitos resultantes, como mostrados na Figura 5 (WÄSTERLUND, 1994; ETANA et al., 1997).

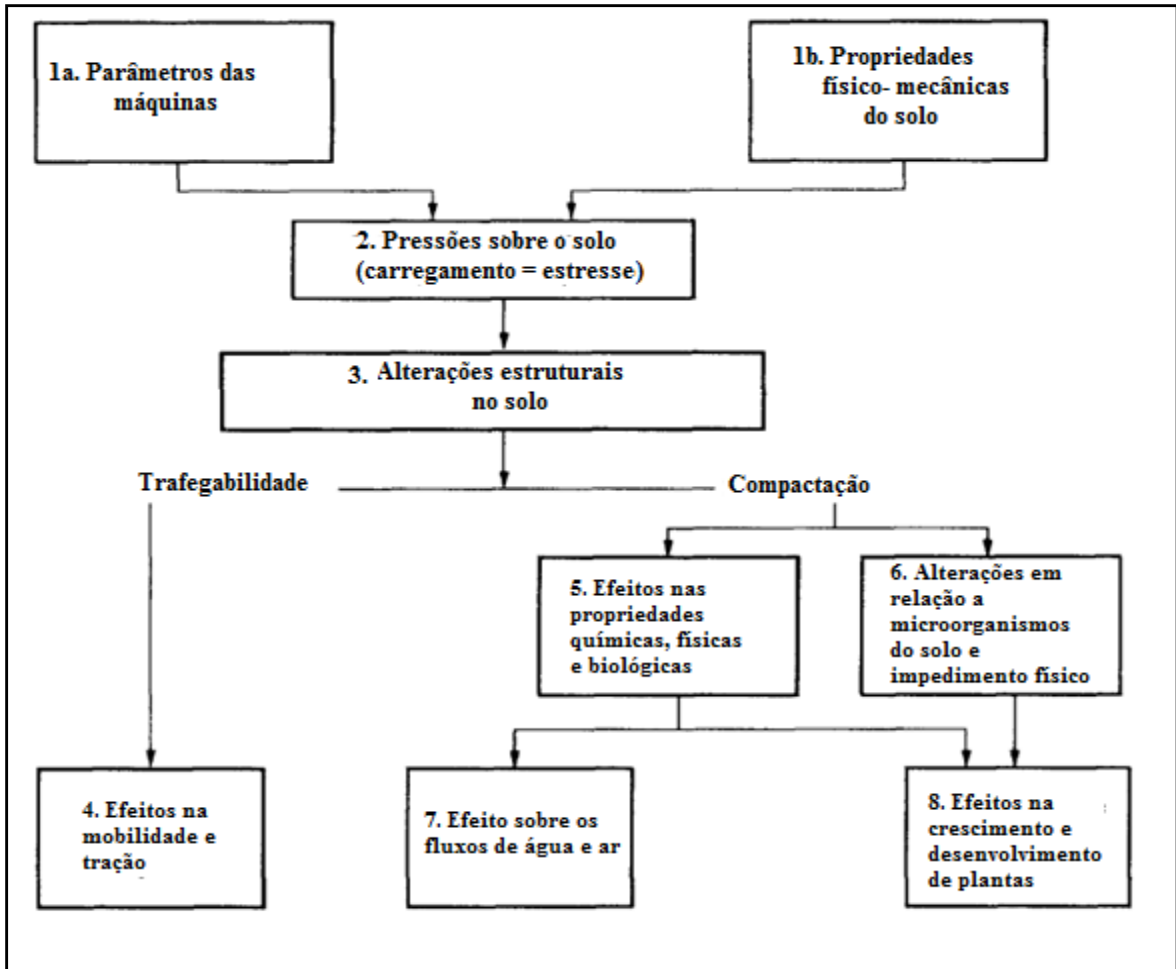


Figura 5 – Interações solo-máquina e seus efeitos. Adaptado de Wåsterlund (1994).

Dessa maneira, infere-se que a compactação pode trazer aumento em relação à trafegabilidade e, conseqüentemente, melhor desempenho e mobilidade das máquinas, embora esses efeitos, geralmente, não sejam almejados, pois o interesse principal que se tem visado é à redução dos efeitos degradantes sobre a qualidade física do solo e produtividade das culturas (GREACEN; SANDS, 1980; REICHERT et al., 2007).

Além disso, apesar da predição da trafegabilidade do solo pela pressão de pré-consolidação seja de grande interesse e que diversos autores tenham buscado valores para diferentes classes de solo, ainda são poucas as pesquisas visando a estimar esse indicador a partir de outras propriedades e atributos do solo. Outra carência é de estudos que relacionem indicadores de trafegabilidade e indicadores de qualidade física do solo com o crescimento de plantas (IMHOFF, 2002).

Dentre os principais indicadores de qualidade física do solo, destaca-se o intervalo hídrico ótimo (IHO). O IHO partiu de Letey (1985), que indicou que a tensão de água no solo, a taxa de difusão de oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes são

os fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas, sendo, portanto, indicadores da qualidade física do solo para o desenvolvimento de culturas. O IHO tem grande importância, pois integra, num só índice, os quatro fatores relacionados diretamente com o crescimento das plantas, sendo a porosidade de aeração (PA) superior a 10 %, umidade no solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), e umidade quando a resistência à penetração do solo (RP) é igual a 2 MPa ou outros valores relacionados a culturas (REICHERT et al., 2007).

Diante disso, a avaliação de indicadores de trafegabilidade, de qualidade física do solo, o uso e o desenvolvimento de funções matemáticas, podem ter grande importância para o aumento da compreensão do processo de compactação, em especial para áreas florestais em que informações são escassas, assim, permitindo avaliar alternativas para a minimização da deterioração física dos solos (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

3 ESTUDO I

QUALIDADE FÍSICA, TRAFEGABILIDADE E PRESSÕES CRÍTICAS DE SOLOS DE USO FLORESTAL

3.1 Introdução

Em áreas florestais, a compactação do solo tem ocorrido, principalmente, em virtude de operações de colheita da madeira, a qual envolve o tráfego intenso de máquinas de grande porte. Essa situação tem provocado alterações significativas nas características físicas, químicas e biológicas do solo, além de afetar o seu potencial produtivo (DIAS JÚNIOR, 1999).

A manutenção e melhoria das condições físicas adequadas ao crescimento de plantas estão relacionadas com a conservação da estrutura do solo, podendo ser alcançada por meio do conhecimento do comportamento compressivo do solo e monitoramento das operações mecanizadas (SEVERIANO et al., 2008). Embora a compactação possa trazer aumento em relação à trafegabilidade e, conseqüentemente, melhor desempenho e mobilidade das máquinas (GREACEN; SANDS, 1980), esses efeitos, geralmente, não são almejados, pois o interesse principal que se tem visado é a redução dos efeitos degradantes sobre a qualidade física do solo e produtividade das culturas (REICHERT et al., 2007).

Nesse sentido, o uso de propriedades mecânicas como a pressão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressão (IC) tem tido importância crescente por serem indicativos da trafegabilidade do solo. A σ_p representa a capacidade de suporte de carga do solo, uma vez que a aplicação de cargas maiores que esse valor leva à compactação adicional do solo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; REICHERT et al., 2009); enquanto o IC representa a susceptibilidade do solo à compactação pela variação do índice de vazios ou da densidade do solo por unidade de pressão aplicada (SILVA et al., 2000). Além desses indicadores, o comportamento do solo em relação à compactação tem sido avaliado por meio do ensaio de Proctor Normal, no qual se pode obter a densidade máxima do solo (D_{SMAX}) e a umidade ótima de compactação (U_{OC}).

O ambiente físico em que se encontram as raízes das plantas no solo é caracterizado pela aeração, temperatura, umidade e resistência mecânica. Portanto, se uma dessas propriedades for alterada, as demais também serão modificadas, em nível variável, conforme a compactação do solo (BOONE; VEEN, 1994). Em função disso, Letey (1985) reuniu, em

um único parâmetro, diversas propriedades físicas associadas com a planta ou com o crescimento radicular e o definiu como *Non-Limiting Water Range* (NLWR). Este parâmetro teve como premissa descrever a faixa de umidade que incorpora limitações do conteúdo de água ao crescimento das plantas, relacionado com a água disponível, aeração e resistência à penetração. Posteriormente, Silva et al. (1994) aprimoraram o conceito do NLWR para *Least Limiting Water Range* (LLWR) como umidade em que são mínimas as limitações para o crescimento das plantas, considerando a tensão de água, porosidade de aeração e resistência à penetração, sendo o termo traduzido como intervalo hídrico ótimo (IHO) (TORMENA et al., 1998). Destaca-se que, além do IHO, a curva de retenção de água no solo (CRA) tem mostrado ser um indicador adequado da qualidade estrutural do solo (DEXTER, 2004).

Pesquisas como de Severiano et al. (2008) demonstram que a alteração de qualquer um dos indicadores de trafegabilidade reflete diretamente nos indicadores de qualidade estrutural do solo, induzindo a condições restritivas ao crescimento de plantas. Tendo esses pressupostos, Imhoff et al. (2001) propuseram que a pressão crítica para o crescimento de plantas (σ_{cr}), definida como a pressão máxima, que poderá ser aplicada ao solo sem decorrer em condições restritivas ao crescimento radicular e sem promover deformação adicional do solo, pode ser estimada a partir da relação entre o IHO e a σ_p .

Em virtude do exposto, percebe-se que relacionar os vários indicadores das propriedades do solo e desenvolver funções matemáticas pode auxiliar na compreensão dos processos que envolvem a compactação, permitindo avaliar alternativas para a minimização da deterioração física dos solos ocasionada pelo tráfego de máquinas de colheita florestal.

O objetivo deste estudo foi determinar indicadores de qualidade física e trafegabilidade para cinco solos florestais, bem como relacionar os indicadores e desenvolver funções matemática, visando, também, a estimar a pressão crítica ao crescimento de plantas.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Caracterização das áreas de estudo

3.2.1.1 Localização, clima e aspectos geológicos

A presente pesquisa foi desenvolvida com base no estudo de solos em áreas de implantação de povoamentos de *Eucalyptus* sp., e em área operacional de colheita da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith, pertencentes à empresa CMPC Celulose Riograndense.

As áreas de implantação situam-se no Horto Florestal Formosa, no município de São Gabriel (Figura 6), Estado do Rio Grande do Sul, entre os paralelos 30°34'20'' S e 54°32'34'' W, e altitude média de 150 m. O clima da região, segundo Köppen, é classificado como subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual de 18 °C e precipitação média anual de 1355 mm (MORENO, 1961). A formação geológica da região é caracterizada por derrames basálticos, afloramentos areníticos e grandes aluviões nas planícies fluviais, situando-se no domínio morfoestrutural do embasamento em estilos complexos, na região geomorfológica do Planalto Sul-Rio-Grandense (RADAMBRASIL, 1986; SANTOS, 2011).

A área operacional de colheita de madeira situa-se no Horto Florestal Erval I, no município de Dom Feliciano (Figura 6), Estado do Rio Grande do Sul, entre os paralelos 39°29'34'' S e 52°12'13'' W, e altitude média de 280 m. O clima da região, segundo Köppen, é classificado como subtropical úmido (Cfa), com a temperatura média anual de 16,5 °C e precipitação média anual de 1600 mm (MORENO, 1961). A formação geológica da região caracteriza-se por apresentar rochas pré-cambrianas, filitos, filitos grafitosos, micaxistos, quartzitos e calcários, em conjunto com embasamento arqueano, correspondente ao Escudo Sul-Rio-Grandense e pertencendo à região geomorfológica do Planalto Sul-Rio-Grandense (CUNHA; GUERRA, 2001).

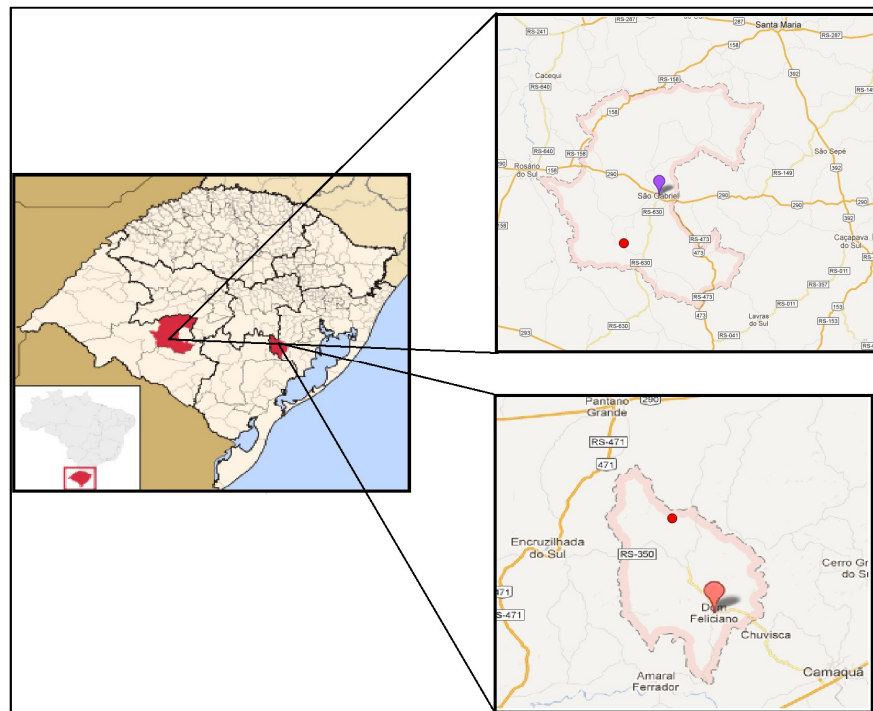


Figura 6 – Localização dos municípios de São Gabriel (superior) e Dom Feliciano (inferior) no Estado do Rio Grande do Sul e dos hortos florestais (pontos vermelhos em cada município) em que se situam as áreas experimentais. Fonte: maps.google.com.

3.2.1.2 Histórico e solos

As áreas de estudo de implantação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. apresentam em seu histórico terem sido utilizadas no passado para fins de produção agropecuária, tendo havido campos de pastagens antes de serem incorporadas recentemente ao sistema de produção florestal. Os solos estudados dessas áreas foram classificados como sendo (i) Planossolo Háplico Eutrófico (SXe) de textura franco-arenosa e relevo plano a suave ondulado; (ii) Argissolo Vermelho Distrófico (PVd) de textura franco-arenosa e relevo plano a suave ondulado; (iii) Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) de textura franco-arenosa e relevo plano a suave ondulado; e (iv) Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd) de textura franca e relevo plano a suave ondulado.

A área de estudo operacional de colheita da madeira caracteriza-se por apresentar povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. com idade de aproximadamente 7 anos, em segunda rotação pelo regime de manejo de talhadia, sendo a colheita da primeira rotação realizada de forma mecanizada. O solo dessa área foi classificado como sendo um Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) de textura franco-arenosa e relevo plano a suave ondulado.

Salienta-se que a classificação dos solos foi realizada pela própria empresa, através do levantamento e mapeamento dos solos existentes em suas áreas, sendo conferida a campo por meio da abertura de perfis.

3.2.2. Procedimento amostral

O principal intuito das amostragens foi buscar diferentes condições que refletissem em variação das propriedades físicas do solo. Para tanto, nas áreas de implantação de povoamentos de *Eucalyptus* sp., as amostragens foram realizadas em dois momentos. O primeiro momento de amostragem do solo ocorreu antes de haver operações de preparo, sendo feita quando o solo estava num estado de compactação maior. Essa primeira amostragem foi feita durante o mês de fevereiro de 2011. O segundo momento de amostragem caracterizou-se por ter sido realizado após o preparo do solo, estando este em menor estado de compactação. Essa amostragem posterior aconteceu quatro meses após o preparo do solo das áreas, durante o mês de julho de 2011, sendo esse intervalo aguardado para que o solo tivesse um rearrajamento natural, possibilitando a coleta de amostras.

Em cada classe de solo estudado, com base em informações prévias fornecidas pela empresa, foram escolhidas três unidades amostrais, nas quais foram abertas uma trincheira

para amostragem na condição antes do revolvimento (maior estado de compactação) e outra, ao lado, em solo subsolado (menor estado de compactação). O preparo do solo foi realizado por um trator agrícola equipado com subsolador de três hastes (Figura 7), o qual revolveu as camadas do solo até a profundidade média de 50 cm, resultando numa área e volume mobilizado de solo médio de 0,213 m² e 607,2 m³ ha⁻¹, respectivamente.



Figura 7 – Operação de preparo do solo; (a) trator agrícola empregado; (b) aspecto do solo após revolvimento.

Na área operacional de colheita de madeira, as amostragens foram feitas por meio da distribuição de três unidades amostrais (blocos), nos quais foram delimitadas parcelas que representaram diferentes condições de intensidade de tráfego de máquinas de colheita sobre o solo.

As intensidades de tráfego compreenderam condições em que não houve tráfego de máquinas (menor estado de compactação) e após uma passada de um trator florestal *Harvester* seguidas de sucessivas passadas um trator florestal *Forwarder* (maior estado de compactação), sendo que o primeiro trator executa as operações de corte e processamento das árvores em toras, e, o segundo, o baldeio de toras de dentro do talhão até a margem da estrada. Maiores detalhes sobre o experimento na área de colheita de madeira serão discutidos no Estudo II (p. 124).

Em todos os solos estudados, para a coleta de amostras foram abertas trincheiras de aproximadamente 70 cm de profundidade (Figura 8a), procedendo com a coleta em esquema de patamares (Figura 8b), com auxílio de pá de corte, marreta, extrator e facão (Figura 8c).

Cabe ressaltar que todas as amostras foram retiradas nas partes superior, média e inferior de cada camada (Figura 8d), buscando melhor representatividade destas.

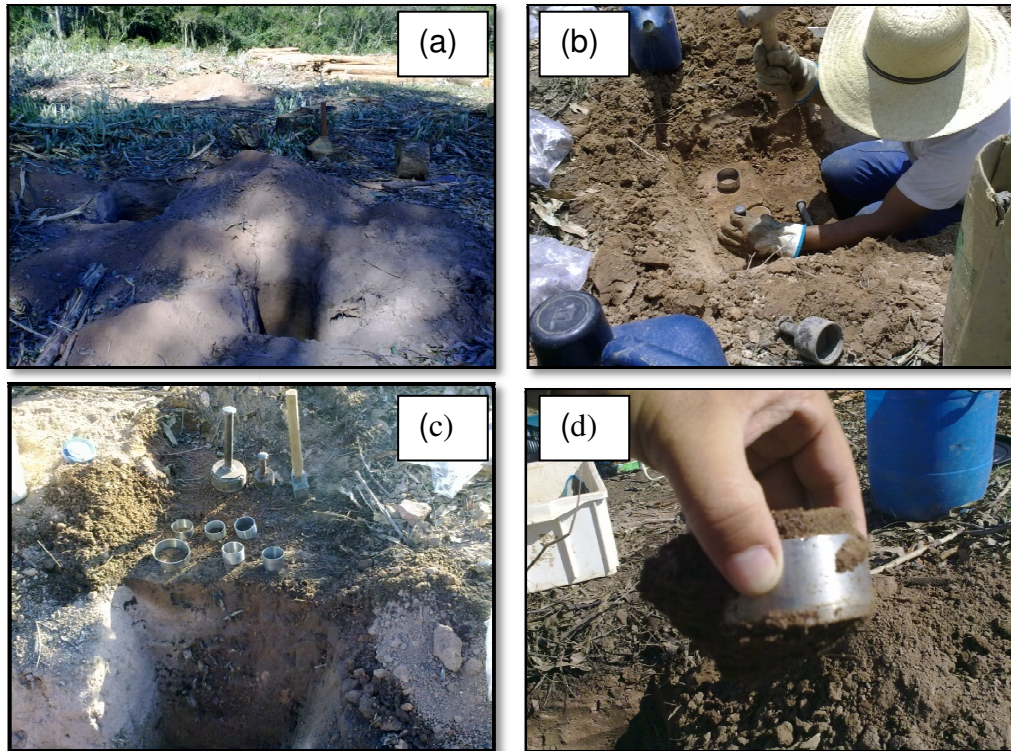


Figura 8 – Trincheiras abertas para a coleta de amostras (a); amostragem em patamares (b); equipamento utilizado para a amostragem (c); amostra com estrutura preservada após ser retirada do solo (d).

Para determinação do intervalo hídrico ótimo, conteúdo de água disponível, curva de retenção de água e distribuição de poros, amostras de solo com estrutura preservada em anéis de 5,7 cm de diâmetro por 4,0 cm de altura foram coletadas nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, e 40 a 60 cm de profundidade. Nas áreas de implantação, no total, foram coletadas 48 amostras por camada de cada solo (8 repetições x 2 estados de compactação x 3 unidades amostrais). Na área de colheita, a coleta se restringiu somente às trilhas de tráfego das máquinas, coletando-se, no total, 72 amostras por camada de profundidade de cada solo (3 repetições x 8 tratamentos x 3 blocos).

Da mesma maneira, foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, para o ensaio de compressão uniaxial, coletando-se, nas áreas de implantação, 30 amostras por camada de cada solo e, na área de colheita, 112 amostras por camada de profundidade do solo.

Ainda, nas mesmas camadas de profundidade, foram coletadas amostras com estrutura deformada para determinações granulométricas, conteúdo de carbono orgânico, densidade de partículas, realização do ensaio de Proctor Normal e limites de consistência, sendo escolhido, em cada solo, somente um perfil representativo para coleta de amostras para o ensaio de Proctor.

Ao final, após coletadas, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e levadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria para que as determinações fossem realizadas.

3.2.3 Determinações

3.2.3.1 Granulometria, carbono orgânico e densidade de partículas

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), o conteúdo de carbono orgânico pelo método da calcinação ou perda de massa por ignição (*loss-on-ignition*) (NELSON; SOMMERS, 1996) e a densidade de partículas, pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

3.2.3.2 Intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado conforme método proposto por Silva et al. (1994). Para a determinação, as amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade, pesadas e obtiveram-se, posteriormente, as umidades nas tensões de 6, 10, 33, 70, 100, 500, 1000 e 1500 kPa, utilizando coluna de areia nas tensões menores (até 10 kPa) e câmaras de Richards nas tensões maiores (a partir de 33 kPa). Após atingir o equilíbrio nas tensões, cada amostra foi submetida ao ensaio de resistência à penetração mecânica (RP), empregando-se um penetrômetro de bancada, equipado com cone de diâmetro de base de 4 mm e ângulo de 30°, e com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um computador para a aquisição dos dados (TORMENA et al., 1998), sendo a velocidade de penetração de 1 cm min⁻¹. Cabe ressaltar, que a RP foi medida no centro de cada amostra, obtendo-se dados a cada 0,01 cm de profundidade por segundo, sendo considerado o valor médio do ensaio de cada amostra, descartando-se os dados extremos e *outliers*.

Após a determinação da RP, as amostras foram colocadas em estufa a 105 °C por até dois dias para determinação da densidade (Ds) e da umidade volumétrica do solo (θ).

Os valores de θ em função da tensão de água (Ψ_m) e da densidade (D_s) foram ajustados utilizando o modelo proposto por Silva et al. (1994) e Betz et al. (1998):

$$\theta = \exp(a + b D_s) \Psi_m^c \quad (1)$$

onde: θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ_m = tensão de água no solo (MPa); e a , b e c = parâmetros de ajuste do modelo.

Os dados de resistência à penetração (RP) foram ajustados em relação à θ e a D_s , utilizando o modelo não-linear proposto por Busscher (1990):

$$RP = a \theta^b D_s^c \quad (2)$$

onde: RP = resistência do solo à penetração (MPa); θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); e a , b e c = parâmetros de ajuste do modelo.

Os coeficientes de ambos os modelos (θ em função de Ψ_m e D_s , e RP em função da θ e D_s) foram obtidos pelo método de Marquardt.

Definiram-se como valores críticos de crescimento de culturas os seguintes parâmetros: umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), umidade em que a resistência do solo à penetração é igual a 2 MPa (θ_{RP}) e umidade em que a porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_{PA}). A θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidas pela equação ajustada da umidade volumétrica, a θ_{RP} foi calculada pela equação ajustada de resistência do solo à penetração e θ_{PA} foi o resultado da subtração da porosidade total menos $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$.

Para o limite inferior do IHO, foi considerada a umidade volumétrica do solo em que a resistência à penetração de raízes atinja 2 MPa (θ_{RP}) ou a quantidade de água no ponto de murcha permanente, considerada a umidade volumétrica do solo na tensão de 1500 kPa (θ_{PMP}).

Para o limite superior do IHO, foi considerada a umidade volumétrica do solo quando a porosidade de aeração é de $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_{PA}) ou o conteúdo de água no solo na capacidade de campo (θ_{CC}), considerada a água retida no solo na tensão de 10 kPa. Para cada valor de D_s , o IHO foi determinado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior.

A densidade crítica (D_{s_IHO}) foi definida quando o valor do IHO foi igual a zero.

Em virtude de alguns autores citarem que a RP crítica ao desenvolvimento de espécies florestais é de até 3 MPa (WHALLEY et al., 1995; ZOU et al., 2000), o IHO também foi

determinado tendo como limite inferior o valor de RP igual a 3 MPa. Dessa forma, obtiveram-se as densidades críticas tanto com RP crítica a 2 MPa ($D_{ScIHO_{RP2MPa}}$), como a 3 MPa ($D_{ScIHO_{RP3MPa}}$).

3.2.3.3 Conteúdo de água disponível, curva de retenção de água e distribuição de poros

O conteúdo de água disponível (AD) no solo foi calculado pela subtração do valor de umidade volumétrica do solo correspondente à capacidade de campo (θ_{cc}), obtido na tensão de água de 10 kPa, pelo valor de umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), obtido na tensão de 1500 kPa, de acordo com Moniz (1972).

Com os valores de umidade nas tensões de 6, 10, 33, 70, 100, 500, 1000 e 1500 kPa, foi realizado o ajuste da curva de retenção de água no solo (CRA), utilizando o modelo de van Genuchten (1980) por meio do programa computacional SWRC (*Soil Water Retention Curve*) (DOURADO-NETO et al., 2001), seguindo a equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (3)$$

onde: θ = umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$); θ_r = umidade residual ($m^3 m^{-3}$); θ_s = umidade de saturação ($m^3 m^{-3}$); ψ = tensão de água (kPa); α , n , m = parâmetros de ajuste da curva de retenção de água, sendo adotada a restrição em que $m = 1 - (1/n)$.

Com base na CRA, foram determinadas as distribuições de tamanho de poros, sendo o diâmetro dos poros calculado a partir da equação (BOUMA, 1991):

$$D = \frac{4 \sigma_t \cos \theta^\circ}{\Psi_m} \quad (4)$$

onde: D = diâmetro do poro (μm); σ_t = tensão superficial da água (73,43 kPa μm a 20 °C); θ° = ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como 0); e Ψ_m = tensão de água no solo (kPa).

3.2.3.4 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e limites de consistência

A densidade máxima do solo ($D_{S_{MAX}}$) e a umidade ótima de compactação (U_{OC}) foram determinadas pelo ensaio de Proctor Normal, o qual seguiu o padrão normalizado pela ABNT/NBR 7182 MB 33, onde a curva de compactação é obtida compactando-se o solo em

três camadas com cinco ou seis umidades, tentando-se conseguir intervalos de 2,5 % de umidade entre os pontos.

O limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) foram determinados conforme as Normas Técnicas da ABNT/NBR 6459 MB 30 e 7180 MB 31, respectivamente. O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o LL e o LP ($IP = LL - LP$), sendo considerados os seguintes intervalos de índice de plasticidade definidos por Atterberg, conforme Reichert et al. (2010): 0 = não plástico; < 0,07 = pouco plástico; 0,07 a 0,17 = média plasticidade; > 0,17 = alta plasticidade.

3.2.3.5 Grau de compactação

O grau de compactação (GC) (HÅKANSSON, 1990) foi calculado pela relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade máxima do solo (D_{sMAX}), obtida pelo ensaio de Proctor Normal, utilizando a seguinte equação:

$$GC = \frac{D_s}{D_{sMAX}} \times 100 \quad (5)$$

onde: GC = grau de compactação (%); D_s = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); e D_{sMAX} = densidade máxima do solo ($Mg\ m^{-3}$), obtida pelo ensaio de Proctor normal.

3.2.3.6 Pressão de pré-consolidação e índice de compressão

A curva de compressão do solo foi determinada com uso de um consolidômetro, marca *Terraload*, modelo S-450 (Figura 9), no qual, primeiramente, as amostras de estrutura preservada foram saturadas e, então, equilibradas nas tensões de água de 6, 10, 33, 70, 100, 500, 1000 e 1500 kPa, sendo submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com a aplicação sucessiva e contínua de tensões normais crescentes e pré-estabelecidas de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada tensão normal (σ) foi aplicada pelo tempo de cinco minutos, pois cerca de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo (SILVA et al., 2000).



Figura 9 – Consolidômetro utilizado nos ensaios de compressão uniaxial.

Após a realização do ensaio, as amostras foram colocadas em estufa a 105 °C por até dois dias para determinação da densidade (D_s) e umidade volumétrica (θ) do solo (BLAKE; HARTGE, 1986). A densidade, antes do ensaio de compressão, foi definida como a densidade do solo inicial. O índice de vazios (ε) foi determinado pela equação proposta por McBride e Joosse (1996):

$$\varepsilon = \frac{D_p}{D_s} - 1 \quad (6)$$

onde: D_p = densidade de partículas do solo (Mg m^{-3}); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}).

A relação entre índice de vazios e tensões normais aplicadas (σ) foi descrita pelo modelo de van Genuchten (1980), adaptado para as variáveis do processo de deformação do solo conforme Reinert et al. (2003):

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_f}{[1 + (a\sigma)^n]^m} \quad (7)$$

onde: ε_f = índice de vazios final; ε_i = índice de vazios inicial; σ = tensão normal aplicada (kPa); α , n , m = parâmetros de ajuste do modelo, adotando-se a restrição em que $m = 1 - (1/n)$.

Os parâmetros do modelo foram estimados pelo método de Marquardt. A reta virgem foi definida pelo segmento de reta tangente ao ponto de inflexão da curva de compressão

ajustada e o índice de compressão (IC) foi definido pela inclinação da reta virgem. A pressão de pré-consolidação (σ_p) foi estimada pelo valor de σ na intersecção da reta virgem com a reta bissetriz, de acordo com o método de Casagrande descrito em Holtz e Kovacs (1981). Com o intuito de se obterem valores de σ_p sem a subjetividade inerente ao método gráfico de Casagrande, foram determinados matematicamente o ponto de máxima curvatura (PMC) e o ponto de inflexão (PI), por meio de um algoritmo desenvolvido em *Visual Basic for Applications* (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas), que calcula a curvatura (C) para todos os valores de σ , usando a seguinte equação, conforme Gregory et al. (2006) :

$$C = \left| \frac{d^2 \varepsilon / d^2 \sigma}{\left[1 + (d\varepsilon / d\sigma)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right| \quad (8)$$

onde: $d\varepsilon/d\sigma$ e $d^2\varepsilon/d^2\sigma$ = primeira e segunda derivadas do modelo ajustado, respectivamente.

Os dados de amostras que apresentaram falha de convergência durante o ajuste da curva de compressão foram eliminados.

3.2.3.7 Estimativa da pressão crítica para o crescimento de plantas

Para estimativa da pressão crítica (σ_{cr}) ao crescimento de plantas, pressupôs-se que a pressão de pré-consolidação (σ_p) é dependente da umidade (θ) e densidade do solo (Ds) (SILVA et al., 2000; IMHOFF, 2002; SEVERIANO et al., 2010; GOULART, 2012). Portanto, ajustaram-se equações de estimativa da σ_p em função de θ e Ds. Dessa forma, com a determinação do IHO, foi substituída na equação a Ds pelo valor de densidade crítica (Ds_{cIHO}), assim, permitindo estimar a capacidade de suporte de carga do solo, levando em consideração a qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas; ou seja, a pressão crítica suportada pelo solo. No entanto, visto que a σ_p também varia com a umidade, foi necessário determinar a faixa de umidade que incorporará as limitações para o crescimento das plantas, sendo esta correspondente aos valores de umidade na amplitude máxima do IHO, nos limites superior e inferior, assim, obtendo o intervalo de pressão crítica do solo.

3.2.3.8 Relações entre variáveis e desenvolvimento de funções

As relações entre as variáveis foram verificadas por meio de correlação linear de Pearson (r). Para o desenvolvimento de pedofunções, foram testados e avaliados modelos obtidos na literatura, como também modelos por regressão linear múltipla pelo procedimento

Stepwise, aceitando-se somente a inclusão de variáveis explicativas com significância acima de 5 %.

Cabe salientar que, visando à melhoria nos ajustes de equações, foi realizada análise exploratória dos dados das variáveis de interesse para detecção e eliminação de *outliers*, seguindo os critérios citados por Tukey (1977), Hoaglin et al. (1983), e Regazzi e Leite (1993), que orientam:

1. eliminar um dado quando for possível afirmar que houve erro de medição ou determinação;
2. eliminar um dado quando este 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:

$$LS = QS + 1,5 AI \quad e \quad LI = QI - 1,5 AI \quad (9, 10)$$

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

Por fim, a avaliação estatística dos modelos foi feita por meio do coeficiente de determinação (R^2) (DRAPER; SMITH, 1981), erro padrão da estimativa (Syx), valor de F e, em alguns casos, análise gráfica de resíduos em percentagem.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1. Caracterização dos solos estudados

A composição granulométrica, o conteúdo de carbono orgânico e a densidade de partículas para as quatro camadas dos solos avaliados estão discriminadas na Tabela 1. Os Planossolos apresentaram maiores valores médios de conteúdo de argila e, principalmente, de silte, sendo o conteúdo de areia grossa inferior em comparação aos Argissolos e Cambissolo. Além disso, pode-se observar que o conteúdo de carbono orgânico (C-org) também foi ligeiramente superior nos referidos primeiros solos. Em geral, os maiores valores médios de densidade de partículas foram do Cambissolo Háplico (CXbd), uma vez que o mesmo apresentou a composição granulométrica mais grosseira e menor C-org. Ainda, nota-se que os Argissolos apresentaram os maiores valores médios de areia fina.

Tabela 1 – Conteúdos médios de argila, silte, areia fina e grossa, cascalho, carbono orgânico e densidade de partículas (\pm desvio padrão) para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	Argila*	Silte	Areia fina	Areia grossa	Cascalho	C-org	Dp
	g kg ⁻¹						Mg m ⁻³
Planossolo Háplico Eutrófico (SXE)							
0 – 10	120,5 (\pm 10,8)	320,9 (\pm 111,0)	408,5 (\pm 107,3)	150,2 (\pm 47,4)	43,3 (\pm 9,7)	15,82 (\pm 9,74)	2,33 (\pm 0,03)
10 – 20	139,3 (\pm 9,9)	311,0 (\pm 106,0)	421,9 (\pm 71,7)	127,8 (\pm 27,2)	32,6 (\pm 8,0)	7,91 (\pm 2,84)	2,50 (\pm 0,03)
20 – 40	159,6 (\pm 35,0)	318,6 (\pm 124,2)	394,9 (\pm 51,9)	126,9 (\pm 38,8)	30,6 (\pm 8,4)	8,30 (\pm 1,05)	2,53 (\pm 0,03)
40 – 60	286,4 (\pm 74,2)	278,6 (\pm 101,4)	326,3 (\pm 76,6)	108,7 (\pm 38,4)	5,8 (\pm 4,1)	8,86 (\pm 3,27)	2,51 (\pm 0,07)
Argissolo Vermelho Distrófico (PVd)							
0 – 10	116,7 (\pm 3,8)	174,8 (\pm 17,3)	495,8 (\pm 64,8)	212,7 (\pm 51,6)	20,9 (\pm 2,0)	15,44 (\pm 0,27)	2,39 (\pm 0,04)
10 – 20	129,4 (\pm 8,3)	185,2 (\pm 20,6)	503,0 (\pm 38,2)	182,3 (\pm 23,9)	17,3 (\pm 7,6)	11,04 (\pm 4,24)	2,51 (\pm 0,08)
20 – 40	140,7 (\pm 10,9)	191,5 (\pm 17,9)	484,1 (\pm 31,4)	183,7 (\pm 26,4)	36,8 (\pm 11,4)	7,51 (\pm 0,74)	2,55 (\pm 0,03)
40 – 60	200,0 (\pm 36,1)	177,9 (\pm 14,8)	420,4 (\pm 92,9)	201,7 (\pm 72,3)	35,0 (\pm 20,5)	5,95 (\pm 0,08)	2,55 (\pm 0,02)
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)							
0 – 10	109,2 (\pm 2,5)	135,1 (\pm 69,7)	583,5 (\pm 2,8)	172,2 (\pm 74,9)	15,1 (\pm 0,6)	13,33 (\pm 0,06)	2,47 (\pm 0,08)
10 – 20	110,1 (\pm 16,1)	195,7 (\pm 20,7)	513,5 (\pm 73,0)	180,7 (\pm 98,9)	10,6 (\pm 10,2)	8,19 (\pm 1,35)	2,53 (\pm 0,06)
20 – 40	153,5 (\pm 3,5)	189,3 (\pm 28,0)	488,1 (\pm 62,6)	169,0 (\pm 90,4)	15,7 (\pm 0,9)	7,52 (\pm 1,86)	2,54 (\pm 0,03)
40 – 60	170,4 (\pm 31,2)	181,4 (\pm 17,8)	486,2 (\pm 88,0)	161,9 (\pm 108,1)	20,0 (\pm 10,3)	6,47 (\pm 2,30)	2,47 (\pm 0,07)
Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd)							
0 – 10	158,2 (\pm 21,6)	424,4 (\pm 23,6)	322,0 (\pm 23,8)	95,4 (\pm 26,0)	66,9 (\pm 57,8)	21,06 (\pm 5,19)	2,35 (\pm 0,05)
10 – 20	180,2 (\pm 18,5)	412,3 (\pm 16,9)	318,1 (\pm 29,2)	89,4 (\pm 6,2)	38,0 (\pm 32,1)	14,09 (\pm 1,39)	2,48 (\pm 0,07)
20 – 40	221,5 (\pm 43,9)	407,0 (\pm 23,9)	289,7 (\pm 27,0)	81,9 (\pm 10,0)	76,8 (\pm 43,3)	12,49 (\pm 1,29)	2,42 (\pm 0,08)
40 – 60	348,0 (\pm 26,2)	437,9 (\pm 34,3)	175,9 (\pm 46,4)	38,3 (\pm 12,3)	10,7 (\pm 8,0)	9,80 (\pm 0,60)	2,44 (\pm 0,09)
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)							
0 – 10	80,5 (\pm 18,9)	216,7 (\pm 55,2)	301,6 (\pm 38,8)	401,3 (\pm 57,8)	63,8 (\pm 26,4)	9,21 (\pm 4,42)	2,46 (\pm 0,04)
10 – 20	91,8 (\pm 17,8)	216,0 (\pm 54,1)	282,8 (\pm 26,9)	409,3 (\pm 60,8)	81,9 (\pm 35,6)	7,59 (\pm 3,50)	2,57 (\pm 0,11)
20 – 40	135,8 (\pm 11,8)	227,2 (\pm 58,3)	257,5 (\pm 24,6)	379,5 (\pm 62,3)	172,0 (\pm 100,3)	8,26 (\pm 2,41)	2,57 (\pm 0,16)
40 – 60	179,4 (\pm 42,5)	246,8 (\pm 50,6)	233,4 (\pm 20,4)	340,4 (\pm 58,8)	368,2 (\pm 131,5)	8,11 (\pm 0,78)	2,72 (\pm 0,21)

*Argila: partículas de diâmetro menor que 0,002 mm; Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 a 0,002 mm; Areia fina: partículas de diâmetro entre 0,2 a 0,05 mm; Areia grossa: partículas de diâmetro entre 2 a 0,2 mm; Cascalho: partículas de diâmetro entre 20 a 2 mm; C-org: carbono orgânico do solo; Dp: densidade de partículas.

3.3.2. Indicadores de qualidade física do solo

3.3.2.1 Intervalo hídrico ótimo

Para determinação do IHO, primeiramente os valores de θ foram relacionados à Ψ_m e à D_s pelo modelo proposto por Silva et al. (1994) e Betz et al. (1998), sendo as equações ajustadas e suas respectivas estatísticas de ajuste para as quatro camadas dos solos avaliados, apresentados na Tabela 2.

Em geral, a θ variou negativamente com D_s e Ψ_m , entrando em concordância com os resultados de Silva et al. (1994), que relataram esse comportamento em um solo siltoso, e, também, com os estudos de Silva (2003a), que observou esse fato em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico e em um Latossolo Vermelho distroférico típico. As exceções foram para as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm do SXd, em que a θ se relacionou positivamente com D_s , o que também foi relatado por Betz et al. (1998) em um solo de textura franca; por Silva (2003a), considerando um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, e por Severiano et al. (2011), em relação a Latossolos de regiões do cerrado de diversas composições texturais.

No SXe, os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm de profundidade, ambas equações com R^2 de 0,89, porém, na camada de 20 a 40 cm o S_{yx} foi menor ($0,032 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), embora o valor F tenha sido maior na camada de 40 a 60 cm (554,80). No PVd, os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 10 a 20 cm e 20 a 40 cm de profundidade, com R^2 de 0,81 e 0,80, respectivamente, sendo o S_{yx} igual para as duas camadas ($0,020 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), porém, na camada de 10 a 20 cm o valor F foi maior (780,08). No PVAd, a camada de 40 a 60 cm apresentou no ajuste o maior R^2 (0,84), entretanto, considerou-se que o ajuste das equações foi mais preciso nas camadas de 10 a 20 cm e 20 a 40 cm, pois apresentaram S_{yx} e valor F melhores ($0,029$ e $0,027 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e 422,51 e 634,76, respectivamente), apesar do R^2 ter sido menor (0,74 e 0,81, respectivamente). Para o SXd, as equações tiveram melhores ajustes nas camadas de 40 a 60 cm e 10 a 20 cm, as quais apresentaram R^2 de 0,85 e 0,92; S_{yx} de 0,053 e $0,017 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; e valor F de 503,00 e 1569,33, respectivamente, para as referidas camadas. Por último, no CXbd, os ajustes foram melhores nas camadas de 0 a 10, 20 a 40 e 40 a 60 cm, apresentando R^2 de 0,83, e diferindo quanto aos valores de S_{yx} e F. Em todos os solos e em todas as camadas, as equações ajustadas foram significativas a 1 %.

Tabela 2 – Equações ajustadas para estimativa da umidade volumétrica do solo (θ) em função da tensão de água (Ψ_m) e da densidade (D_s) para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	Equação ajustada	R ²	Syx	Valor F	N
Planossolo Háptico Eutrófico (SXe)					
0 – 10	$\theta = \exp (-1,7915 - 0,1643 D_s) \Psi_m^{-0,2090}$	0,78	0,048	312,62**	33
10 – 20	$\theta = \exp (-1,4922 - 0,3427 D_s) \Psi_m^{-0,1635}$	0,73	0,042	271,58**	29
20 – 40	$\theta = \exp (0,0114 - 1,4226 D_s) \Psi_m^{-0,1839}$	0,89	0,032	489,18**	30
40 – 60	$\theta = \exp (-0,4225 - 1,0980 D_s) \Psi_m^{-0,2072}$	0,89	0,035	554,80**	31
Argissolo Vermelho Distrófico (PVd)					
0 – 10	$\theta = \exp (-1,3679 - 0,4246 D_s) \Psi_m^{-0,1434}$	0,73	0,040	347,70**	35
10 – 20	$\theta = \exp (-2,2114 - 0,0219 D_s) \Psi_m^{-0,1447}$	0,81	0,020	780,08**	39
20 – 40	$\theta = \exp (-1,3195 - 0,5477 D_s) \Psi_m^{-0,1360}$	0,80	0,020	754,65**	34
40 – 60	$\theta = \exp (-1,7162 - 0,2788 D_s) \Psi_m^{-0,1356}$	0,77	0,022	534,84**	34
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)					
0 – 10	$\theta = \exp (-0,7858 - 0,8442 D_s) \Psi_m^{-0,1319}$	0,80	0,032	420,59**	31
10 – 20	$\theta = \exp (-1,9920 - 0,2557 D_s) \Psi_m^{-0,1785}$	0,74	0,029	422,51**	43
20 – 40	$\theta = \exp (0,0388 - 1,4372 D_s) \Psi_m^{-0,1530}$	0,81	0,027	634,76**	46
40 – 60	$\theta = \exp (1,3267 - 2,3305 D_s) \Psi_m^{-0,1926}$	0,84	0,034	372,51**	37
Planossolo Háptico Distrófico gleissólico (SXd)					
0 – 10	$\theta = \exp (-2,6003 + 0,7828 D_s) \Psi_m^{-0,0895}$	0,73	0,031	594,23**	35
10 – 20	$\theta = \exp (-2,0604 + 0,1915 D_s) \Psi_m^{-0,1333}$	0,92	0,017	1569,33**	35
20 – 40	$\theta = \exp (-0,3576 - 0,9521 D_s) \Psi_m^{-0,0896}$	0,68	0,032	475,56**	37
40 – 60	$\theta = \exp (-0,2486 - 0,8040 D_s) \Psi_m^{-0,1293}$	0,85	0,053	503,00**	36
Cambissolo Háptico Tb Distrófico (CXbd)					
0 – 10	$\theta = \exp (-2,2836 - 0,0436 D_s) \Psi_m^{-0,1586}$	0,83	0,028	785,72**	55
10 – 20	$\theta = \exp (-1,9545 - 0,1797 D_s) \Psi_m^{-0,1433}$	0,75	0,031	615,11**	48
20 – 40	$\theta = \exp (-1,3207 - 0,5791 D_s) \Psi_m^{-0,1469}$	0,83	0,028	973,17**	57
40 – 60	$\theta = \exp (-2,2334 - 0,0174 D_s) \Psi_m^{-0,1593}$	0,83	0,030	755,15**	48

**significativo a 1 %; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em m³ m⁻³; θ : umidade volumétrica (m³ m⁻³); D_s: densidade do solo (Mg m⁻³); Ψ_m : tensão de água no solo (MPa); N: número de repetições.

Em prosseguimento para a determinação do IHO, foram ajustadas equações para estimativa da RP em função de θ e D_s pelo modelo não-linear de Busscher (1990) (Tabela 3).

Tabela 3 – Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ) e da densidade (Ds) para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	Equação ajustada	R ²	Syx	Valor F	N
Planossolo Háplico Eutrófico (SXe)					
0 – 10	RP = 0,3349 $\theta^{-0,7501}$ Ds ^{1,9455}	0,78	0,613	163,01**	33
10 – 20	RP = 0,2101 $\theta^{-0,7587}$ Ds ^{3,0633}	0,69	0,631	142,91**	29
20 – 40	RP = 0,2112 $\theta^{-0,5939}$ Ds ^{3,2421}	0,70	0,622	137,15**	30
40 – 60	RP = 0,1422 $\theta^{-0,6830}$ Ds ^{3,7509}	0,78	0,545	176,86**	31
Argissolo Vermelho Distrófico (PVd)					
0 – 10	RP = 0,3947 $\theta^{-0,5289}$ Ds ^{1,9523}	0,74	0,437	270,00**	35
10 – 20	RP = 0,0453 $\theta^{-1,6226}$ Ds ^{2,0041}	0,89	0,499	520,77**	39
20 – 40	RP = 0,0131 $\theta^{-1,7986}$ Ds ^{4,0509}	0,76	0,782	165,53**	34
40 – 60	RP = 0,0072 $\theta^{-1,7879}$ Ds ^{5,6893}	0,83	0,635	151,20**	34
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)					
0 – 10	RP = 0,0569 $\theta^{-1,0307}$ Ds ^{4,5442}	0,74	0,571	135,80**	31
10 – 20	RP = 0,0357 $\theta^{-1,2517}$ Ds ^{4,2126}	0,81	0,723	234,77**	43
20 – 40	RP = 0,0752 $\theta^{-1,4256}$ Ds ^{2,0696}	0,73	1,007	182,61**	46
40 – 60	RP = 0,0084 $\theta^{-1,2647}$ Ds ^{7,6216}	0,81	1,106	175,75**	37
Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd)					
0 – 10	RP = 0,0654 $\theta^{-1,4978}$ Ds ^{5,1644}	0,70	0,546	139,46**	35
10 – 20	RP = 0,0836 $\theta^{-1,1384}$ Ds ^{4,8529}	0,69	0,562	106,08**	35
20 – 40	RP = 0,2104 $\theta^{-0,9749}$ Ds ^{2,8498}	0,74	0,527	185,03**	37
40 – 60	RP = 0,3086 $\theta^{-0,7791}$ Ds ^{2,5523}	0,70	0,584	81,45**	36
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)					
0 – 10	RP = 0,0094 $\theta^{-1,5171}$ Ds ^{6,4784}	0,83	0,756	365,31**	55
10 – 20	RP = 0,0038 $\theta^{-1,3469}$ Ds ^{9,1443}	0,81	0,745	281,05**	48
20 – 40	RP = 0,0055 $\theta^{-1,3319}$ Ds ^{8,5826}	0,78	0,716	258,88**	57
40 – 60	RP = 0,0137 $\theta^{-1,6764}$ Ds ^{4,7872}	0,83	0,534	280,21**	48

**significativo a 1 %; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em MPa; RP: resistência do solo à penetração (MPa); θ : umidade volumétrica (m³ m⁻³); Ds: densidade do solo (Mg m⁻³); N: número de repetições.

A RP variou negativamente com θ e positivamente com Ds, como também relatado em outras pesquisas (SILVA et al., 1994; BETZ et al., 1998; TORMENA et al., 1998; IMHOFF,

2002; SILVA, 2003a). O incremento dos valores de RP em função da diminuição de θ é associado com a redução da coesão e ângulo de atrito interno do solo (CAMP; GILL, 1969); enquanto, o incremento da RP com Ds pode ser atribuído ao aumento do estado de compactação do solo, que resulta em aumento da fricção entre as partículas (VEPRASKAS, 1984; REICHERT et al., 2010).

Dentre as equações ajustadas para as camadas avaliadas no SXe, os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 0 a 10 cm e 40 a 60 cm de profundidade, com R^2 de 0,78 para ambas as camadas, sendo que, na camada de 40 a 60 cm, o Syx foi menor (0,545 MPa) e valor F maior (176,86). No PVd, o melhor ajuste ocorreu na camada de 10 a 20 cm com R^2 de 0,89, Syx de 0,499 e valor F de 520,77. Para o PVAd, as camadas de 10 a 20 e 40 a 60 cm tiveram os maiores valores de R^2 (0,81 para ambas), porém o menor Sxy e maior valor F (0,723 MPa e 234,77) foram da primeira camada citada. Já para o SXd, o melhor ajuste para estimativa da RP ocorreu na camada de 20 a 40 cm. Enquanto no CXbd, as camadas de 0 a 10 e 40 a 60 cm apresentaram os maiores R^2 (0,83), porém, o ajuste da equação na primeira camada pode ser considerado melhor em função do Syx ter sido menor e o valor F maior. Em todos os solos e em todas as camadas avaliadas, as equações ajustadas para estimativa da RP foram significativas a 1 %.

Com as equações para estimativa de θ e RP, pode-se calcular o IHO. No SXe, para o IHO calculado com RP crítica de 2 MPa (Figura 10), nas camadas 0 a 10 e 10 a 20 cm de profundidade, o limite superior (LS) e inferior (LI), na máxima amplitude do IHO (IHO_{MAX}), foram θ_{CC} e θ_{PMP} , enquanto que, para as camadas mais profundas (20 a 40 e 40 a 60 cm), o LS e LI foram θ_{PA} e θ_{PMP} . Na camada de 0 a 10 cm de profundidade, o LS do IHO foi a θ_{CC} até a Ds de 1,28 Mg m⁻³ e, a partir desta, o LS foi a θ_{PA} . Na camada seguinte, 10 a 20 cm, o LS foi θ_{CC} em toda a variação de Ds amostrada. Já na camada de 20 a 40 cm, o LS começa com a θ_{PA} , e logo, aproximadamente, na Ds de 1,20 Mg m⁻³, o LS passa a ser a θ_{CC} . Na camada de 40 a 60 cm, o LS do IHO foi a θ_{PA} desde de sua máxima amplitude até quando atinge o valor igual a 0.

Em relação ao LI do IHO, na camada de 0 a 10 cm, este foi a θ_{PMP} até a Ds de 1,14 Mg m⁻³ e, depois, foi a θ_{RP} . Nas outras camadas, pode-se observar que a curva de resistência do solo aumenta rapidamente em função do aumento da Ds. Na camada de 10 a 20 cm, o LI começou sendo a θ_{PMP} até a Ds de 1,28 Mg m⁻³ e, depois, foi a θ_{RP} . Na camada de 20 a 40 cm, o LI, no princípio, foi a θ_{PMP} até o valor de 1,40 Mg m⁻³ de Ds e, depois, passou a ser a θ_{RP} . De modo semelhante, na camada de 40 a 60 cm a θ_{RP} passou a ser o LI a partir da Ds de 1,40 Mg m⁻³.

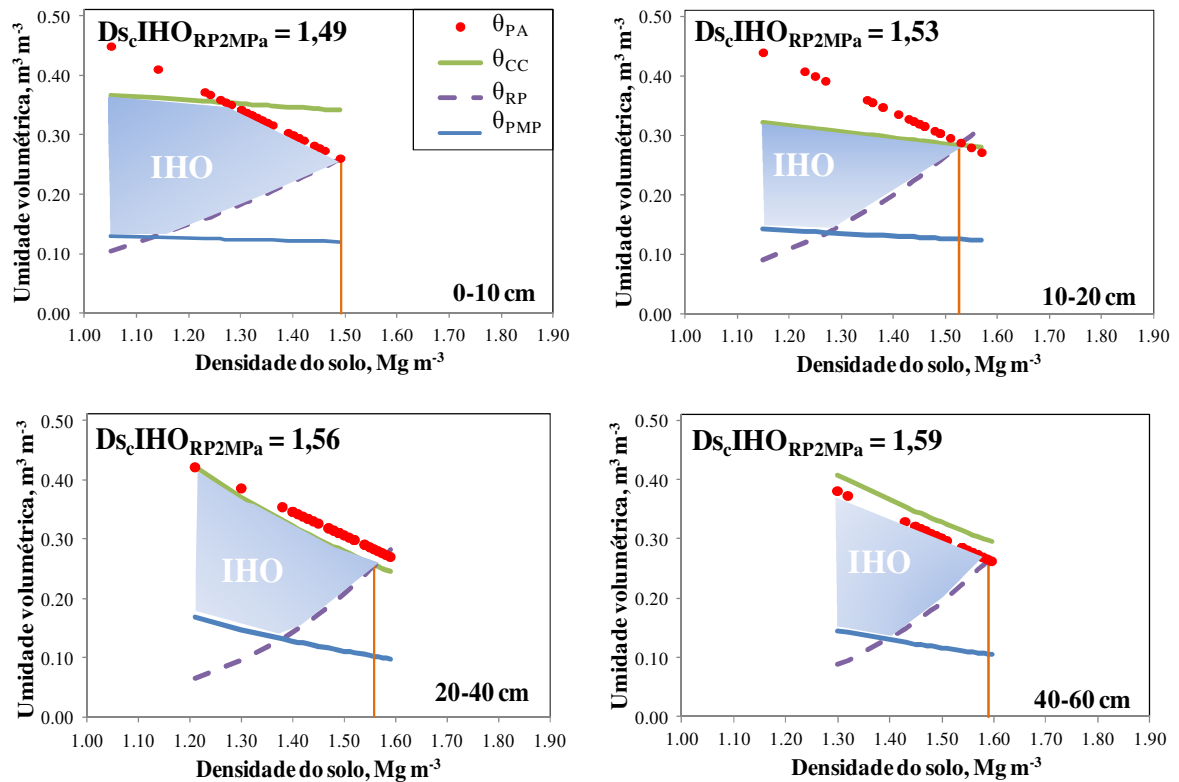


Figura 10 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c,IHO,RP2MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.

No PVD, com o IHO calculado com RP crítica de 2 MPa (Figura 11), a θ_{CC} foi o LS em quase toda a variação de D_s amostrada nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, e em toda a variação de D_s amostrada nas camadas mais profundas. Isso mostra que a PA, apesar de diminuída pelo aumento da D_s , teoricamente não será o principal fator de restrição de crescimento às plantas com base no IHO desse solo. Na camada de 0 a 10 cm de profundidade, a θ_{PMP} foi o LI até a situação de D_s menor do que $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo que acima desse valor de D_s , a θ_{RP} passou a ser o LI. Nas camadas de solo mais profundas, a θ_{RP} foi o limite inferior do IHO, superando à θ_{PMP} em toda a variação de D_s amostrada, fato este, concordante com Silva et al. (1994), Betz et al. (1998), Tormena et al. (1998) e Imhoff (2002), que observaram que a RP é o limite crítico que com maior frequência reduz o IHO dos solos sob condições de diminuição de umidade.

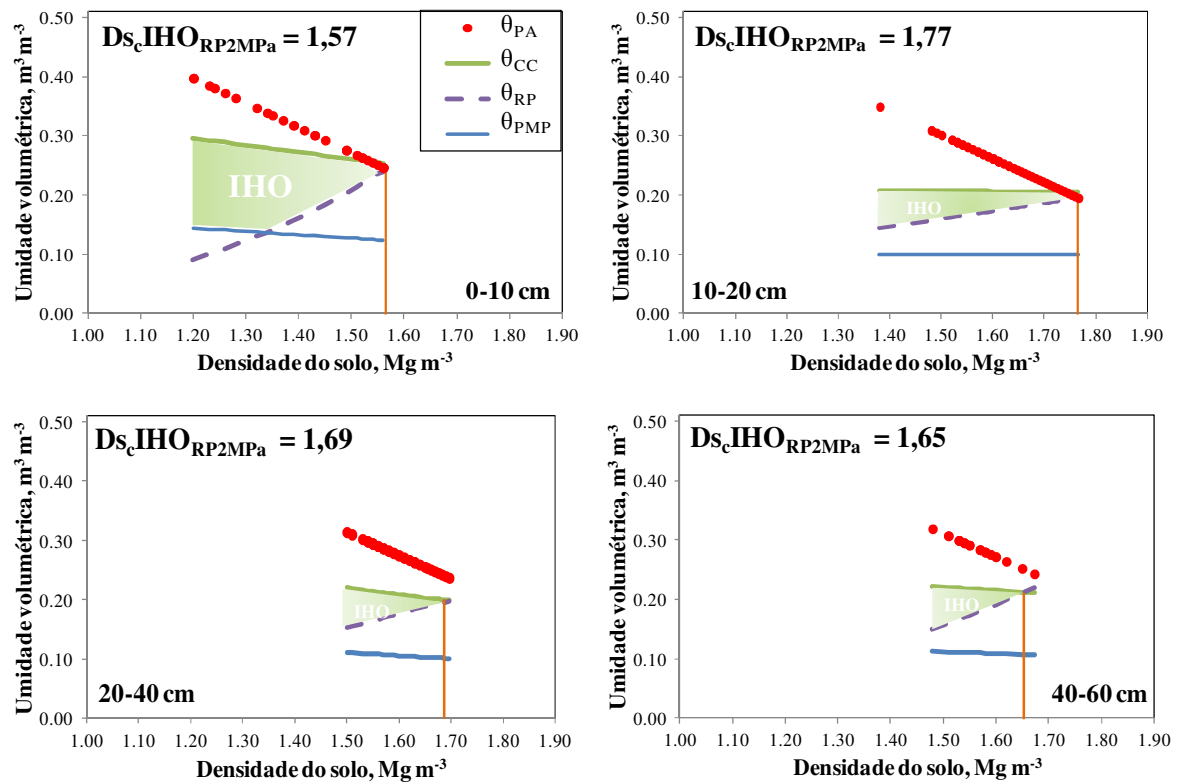


Figura 11 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c, IHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica, considerando RP crítica de 2 MPa.

No PVAd (Figura 12), a θ_{CC} foi o LS em toda a variação de D_s amostrada nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, indicando, outra vez, que a PA, embora reduzida pelo incremento da D_s , em teoria, não será o fator mais importante no sentido de restrição de crescimento de plantas baseado no IHO para este solo. Nas camadas de 0 a 10, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, o LI começa com a θ_{PMP} se tornando depois a θ_{RP} , sendo que na camada de 10 a 20 cm a θ_{RP} é o LI em toda a variação de D_s .

O IHO das camadas avaliadas do SXd é apresentado na Figura 13. Nas duas primeiras camadas deste solo, o incremento em D_s resultou em aumento da retenção de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Segundo Kertzman (1996), o aumento da compactação do solo, geralmente, não afeta a porosidade intra-agregados (microporos), no entanto, os poros estruturais inter-agregados (macroporos) têm seu tamanho reduzido, passando a atuar na retenção de água, e, dessa maneira, contribuindo para o incremento do conteúdo de água retida em tensões baixas. Esse comportamento é associado a solos argilosos, pois estes apresentam agregação das partículas de argila, resultando em poros

intra-agregados de alta estabilidade (BRADY; WEIL, 2008). Porém, resultados de Silva et al. (1994), Betz et al. (1998) e Severiano et al. (2011), mostram que esse comportamento também ocorre em solos de textura mais grosseira, em semelhança ao resultado encontrado.

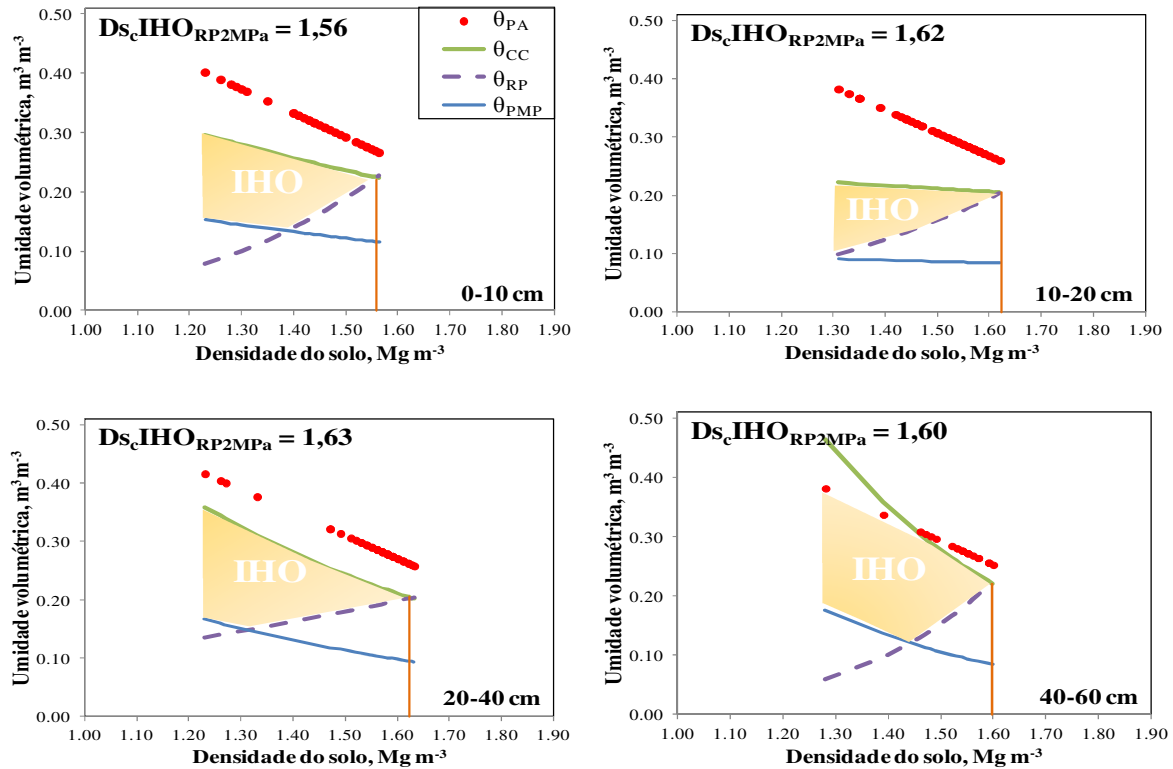


Figura 12 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c,IHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.

Sands et al. (1979) citam que o aumento na proporção de microporos pelo aumento da compactação pode fazer com que o solo venha a apresentar comportamento de como se fosse de textura mais fina, e, dessa forma, a umidade volumétrica na capacidade de campo pode aumentar, crescendo, assim, o volume de água por unidade de volume de solo que está disponível às raízes das árvores. Porém, embora haja aumento do volume de água na capacidade de campo, isso pode não significar melhorias nas condições para o crescimento de plantas, uma vez que outros efeitos adversos também ocorrem em relação às condições estruturais (aumento da RP) e de aeração do solo (diminuição da PA) (OHU et al., 1985).

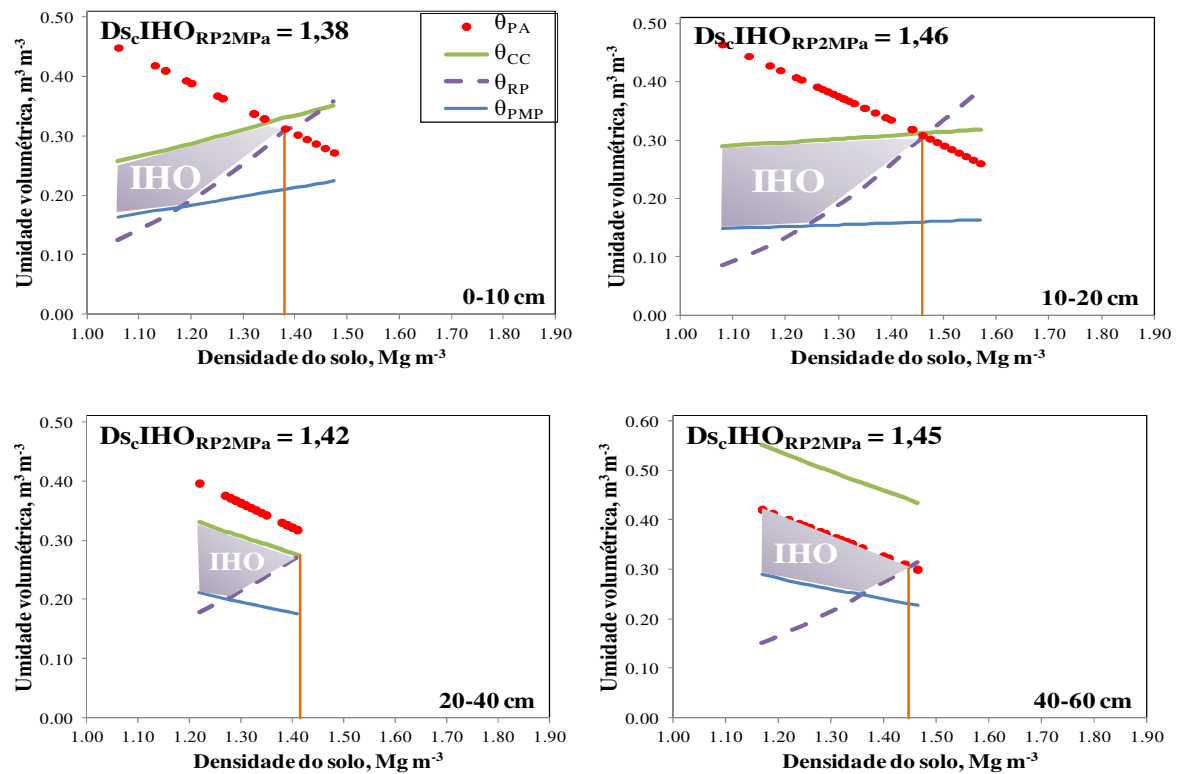


Figura 13 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háptico Distrófico gleissólico (SXd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s,IHO,RP2MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.

Nessas mesmas camadas do SXd (0 a 10 e 10 a 20 cm), o LS foi a θ_{CC} até próximo do ponto onde o IHO é igual a zero. Na camada de 20 a 40 cm, o LS em toda a variação de D_s é a θ_{CC} , ocorrendo o oposto na camada mais profunda, onde o LS é a θ_{PA} . O comportamento do LI é semelhante nas três primeiras camadas de profundidade deste solo, começando com a θ_{PMP} e após um breve aumento da D_s , se alterando pela θ_{RP} . Na camada de 40 a 60 cm, essa alteração ocorre em um intervalo maior de aumento de D_s .

Por fim, no CXbd (Figura 14), a θ_{CC} foi o LS em toda a variação de D_s amostrada para todas as camadas avaliadas. Mais uma vez deixando em evidência que a PA, mesmo com o aumento da D_s , provavelmente não será o fator físico mais importante no sentido de restrição de crescimento das plantas.

Por meio dos resultados de todos os solos, uma leve tendência sugere que a θ_{PA} tende a ser o LS em toda ou maior parte de variação de D_s do IHO de camadas com maior conteúdo de argila, sendo estas as mais profundas, correspondente ao horizonte B textural dos solos. Isso pode ser explicado em função de que grande parte da porosidade de solos ou camadas de

textura mais grosseira, sejam poros inter-agregados, os quais apresentam tamanho maior do que poros intra-agregados, permitindo maior capacidade de aeração e de trocas gasosas ao solo. Além disso, em composições texturais mais grosseiras, quando cargas são submetidas, o atrito entre as partículas é maior, comparando-se a solos de textura mais fina, dificultando a movimentação dessas (LIMA, 2004).

Retornando ao IHO das camadas do CXbd, o LI deste é θ_{RP} em toda ou quase toda a variação de D_s das quatro camadas avaliadas (Figura 14).

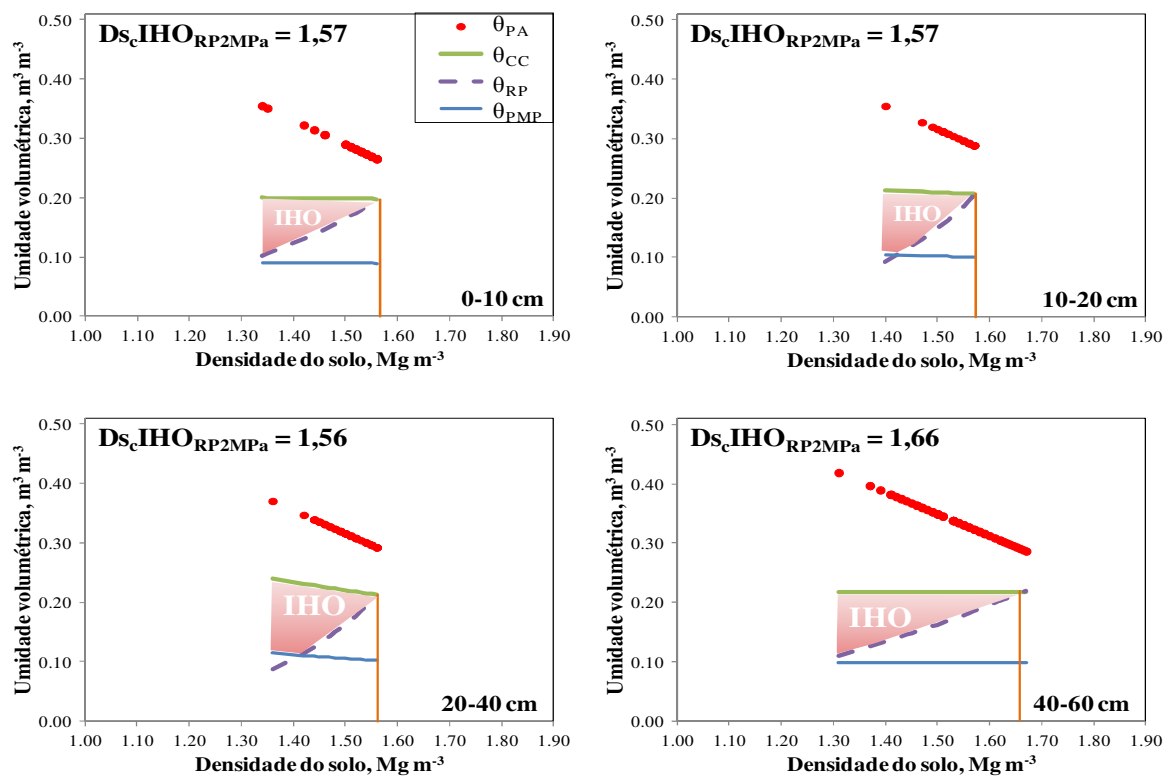


Figura 14 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.

A informação de qual propriedade do solo está limitando o crescimento das plantas é importante para se definirem estratégias de manejo do solo com o objetivo de aumentar o IHO ou evitar que este diminua (SILVA, 2003a). Quando o LS é θ_{PA} e o LI é θ_{RP} , intervenções no manejo do solo podem trazer incremento do IHO. Contudo, quando o LS e o LI do IHO são a

θ_{CC} e θ_{PMP} , o manejo dado ao solo tem menor influência sobre estas propriedades, uma vez que estas são ligadas a atributos como a textura do solo.

Recalculando-se o IHO para valores de RP crítica de 3 MPa (Anexos 1, 2, 3, 4 e 5), a amplitude da faixa de umidade do IHO de todos os solos é aumentada. No entanto, em nenhum momento a θ_{RP} deixa de ser o LI quando o IHO é igual a zero (Tabela 4), mostrando claramente a importância da resistência do solo à penetração como fator físico limitante ao crescimento radicular das plantas.

Tabela 4 – Valores de densidade crítica (D_{s_cIHO}) e limites superior e inferior para o intervalo hídrico em máxima amplitude (IHO_{MAX}) e quando igual a zero ($IHO = 0$), considerando-se RP crítica de 2 e 3 MPa para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	IHO $\theta_{RP} = 2$ MPa					IHO $\theta_{RP} = 3$ MPa				
	D_{s_cIHO} ($Mg\ m^{-3}$)	IHO_{MAX}		$IHO = 0$		D_{s_cIHO} ($Mg\ m^{-3}$)	IHO_{MAX}		$IHO = 0$	
		LS	LI	LS	LI		LS	LI	LS	LI
Planossolo Háplico Eutrófico (SXE)										
0 – 10	1,49	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,64	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
10 – 20	1,53	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,66	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
20 – 40	1,56	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,70	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,59	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,71	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
Argissolo Vermelho Distrófico (PVD)										
0 – 10	1,57	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,75	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
10 – 20	1,77	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,85	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{PA}	θ_{RP}
20 – 40	1,69	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,81	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,65	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,76	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)										
0 – 10	1,56	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,67	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
10 – 20	1,62	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,77	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
20 – 40	1,63	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,75	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,60	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,66	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd)										
0 – 10	1,38	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,45	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
10 – 20	1,46	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}	1,57	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
20 – 40	1,42	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,56	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,45	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,59	θ_{PA}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)										
0 – 10	1,57	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,67	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
10 – 20	1,57	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,64	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
20 – 40	1,56	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,63	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,66	θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{CC}	θ_{RP}	1,80	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}

θ_{PA} = umidade em que a porosidade de aeração é igual a $0,1\ m^3\ m^{-3}$; θ_{CC} = umidade em capacidade de campo; θ_{RP} = umidade em que a resistência do solo à penetração é igual a 2 ou 3 MPa; θ_{PMP} = umidade em ponto de murcha permanente.

Conforme a D_s do solo aumenta, a magnitude do IHO diminui, assim, o valor de D_s em que ocorre a interseção do limite superior e inferior ($IHO = 0$) é denominado de densidade do solo crítica (D_{s_cIHO}). Com o IHO calculado com RP crítica de 2 MPa, no SXe, a $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$ foi de 1,49, 1,53, 1,56 e 1,59 $Mg\ m^{-3}$ para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente. Para o PVd, o valor de $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$ foi de 1,57, 1,77, 1,69 e 1,65 $Mg\ m^{-3}$ para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente. No PVAd, os valores para as quatro camadas foram, respectivamente, 1,56, 1,62, 1,63 e 1,60 $Mg\ m^{-3}$. O SXd apresentou os menores valores de $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$, sendo de 1,38, 1,46, 1,42 e 1,45 $Mg\ m^{-3}$ para as quatro camadas de profundidade, respectivamente. Enfim, para o CXbd, os valores foram de 1,57, 1,57, 1,56 e 1,66 $Mg\ m^{-3}$, para as respectivas quatro camadas do solo (Tabela 4).

Recalculando-se o IHO para valores de RP crítica de 3 MPa, no SXe o valor de D_{s_cIHO} aumentou em torno de 9 % para as quatro camadas de profundidade. No PVd, PVAd, SXd e CXbd, o aumento do valor de D_{s_cIHO} foi, em média, de 7, 7, 8 e 6 %, respectivamente (Tabela 4).

Comparando-se os dados de todos os solos analisados, o SXd, seguido do SXe, apresentaram, em geral, os menores valores de D_{s_cIHO} . Isso foi devido a D_{s_cIHO} ter se relacionado negativamente com os conteúdos de argila e silte dos solos (Figura 15), e, como os anteriormente referidos solos apresentaram maiores conteúdos de argila e silte (Tabela 1), justifica-se os menores de valores de D_{s_cIHO} .

A correlação da D_{s_cIHO} somente com o conteúdo de argila D_{s_cIHO} foi negativa e não significativa (Figura 15a). Com o conteúdo de silte a relação também foi negativa, contudo, foi com este atributo que a D_{s_cIHO} apresentou os maiores coeficientes de correlação linear de Pearson, sendo de 0,80 e 0,73, para $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$ e $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$, respectivamente (Figura 15b). Com os conteúdos de argila mais silte somados, a relação também foi negativa, porém a correlação foi mais fraca com a D_{s_cIHO} (Figura 15c) em comparação com o conteúdo de silte somente. Com o conteúdo de areia fina, a correlação com a D_{s_cIHO} foi positiva e significativa (Figura 15d), enquanto que com a areia grossa foi positiva e não houve significância (Figura 15e), e, por fim, com o conteúdo de carbono orgânico, a correlação foi significativa e negativa (15f).

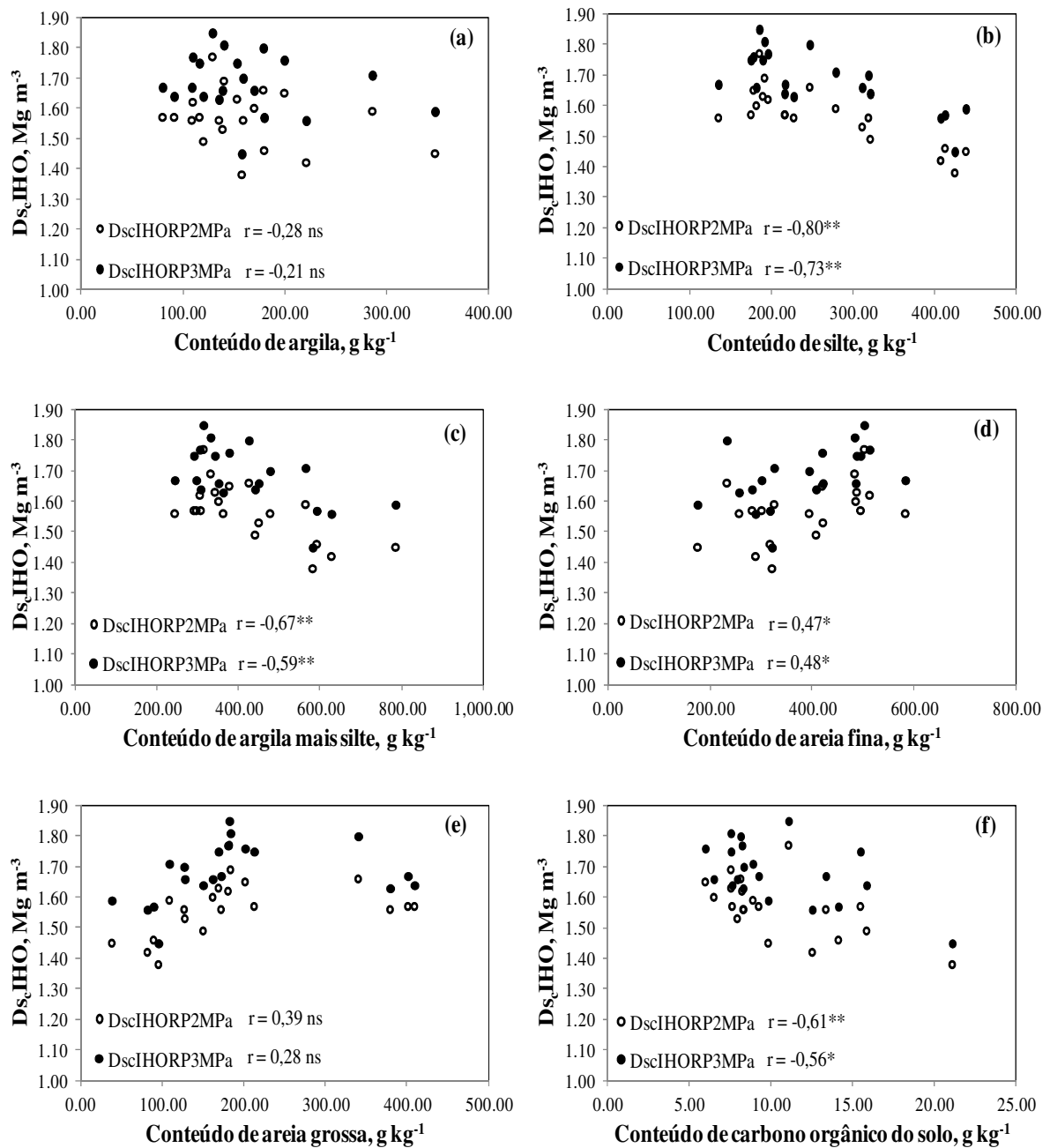


Figura 15 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{s_c,IHO_{RP2MPa}}$) e a 3 MPa ($D_{s_c,IHO_{RP3MPa}}$), com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f); *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

Relações semelhantes também foram demonstradas por Jones (1983), Reichert et al. (2009) e Severiano et al. (2011), que propuseram equações de regressão linear para estimativa da $D_{s_c,IHO}$ em função do conteúdo de argila e, também, pelo conteúdo de argila mais silte. Assim, com o mesmo intuito desses autores, também se procurou ajustar modelos de

regressão para estimativa da $D_{s_c}IHO$, tanto com RP crítica de 2 MPa, como também, com a RP crítica de 3 MPa (Tabela 5).

Tabela 5 – Equações ajustadas para estimativa da densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$) e a 3 MPa ($D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$).

Variável Dependente	Variáveis Independentes			R^2	Syx	Valor F
$D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$	Intercepto	Silte	C-org			
	1,72359	- 0,000668		0,77	0,0381	49,5**
N = 17	1,76715	- 0,000522	- 0,00786	0,91	0,0247	69,5**
$D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$	Intercepto	Silte	C-org			
	1,85810	- 0,000694		0,54	0,0634	13,7**
N = 19	1,90036	- 0,000532	- 0,00828	0,64	0,0584	14,1**

**significativo a 1%; R^2 : coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em $Mg\ m^{-3}$; Silte: conteúdo de silte em $g\ kg^{-1}$; C-org: conteúdo de carbono orgânico do solo em $g\ kg^{-1}$; N: número de repetições.

Em concordância ao observado nas correlações, pode-se ver que o conteúdo de silte foi a variável independente que mais explicou a variação dos valores de $D_{s_c}IHO$ (Tabela 5). Com a adição de C-org como variável explicativa, ambas as equações para estimativa da $D_{s_c}IHO$ tiveram suas estatísticas de ajuste melhoradas, resultando num R^2 de 0,91 para $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ e R^2 de 0,64 para $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$.

Nota-se que o ajuste da equação para estimativa da $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ foi superior em comparação ao ajuste para estimativa da $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, o que pode ser atribuído, provavelmente, à diferente condição estrutural em que se encontra o solo quando na $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ em relação quando na $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, e, dessa forma, gerando maiores incertezas e menor relação entre os atributos que são relacionados ao IHO.

Em todos os solos, considerando a RP crítica de 2 MPa, o IHO ficou negativamente correlacionado com a Ds (Figura 16). No SXe, a diminuição do IHO ocorreu seguindo uma tendência menos abrupta a princípio, e depois acentuou-se, a partir de determinado valor de Ds, sendo isso, devido à influência da curva de resistência do solo à penetração (Figura 16a).

No PVD, na camada de 0 a 10 cm o IHO diminuiu pouco até a Ds de $1,34\ Mg\ m^{-3}$ e, após esse valor decresceu acentuadamente, devido à curva de resistência do solo. Nas outras camadas, como a θ_{RP} é o limite inferior em toda a variação do IHO amostrada, o declínio do IHO em função da Ds ocorreu quase linearmente (Figura 16b).

No PVAd, na camada de 0 a 10 cm, a diminuição do IHO com o aumento da D_s ocorreu de maneira pouco abrupta até a D_s de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, e, então, depois desse ponto acentou-se devido ao limite inferior passar a ser a θ_{RP} , o que, em semelhança, também ocorreu na camada de 40 a 60 cm. Nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm, o declínio do IHO com D_s foi praticamente linear devido à θ_{RP} ter sido o limite inferior em toda a variação do IHO (Figura 16c).

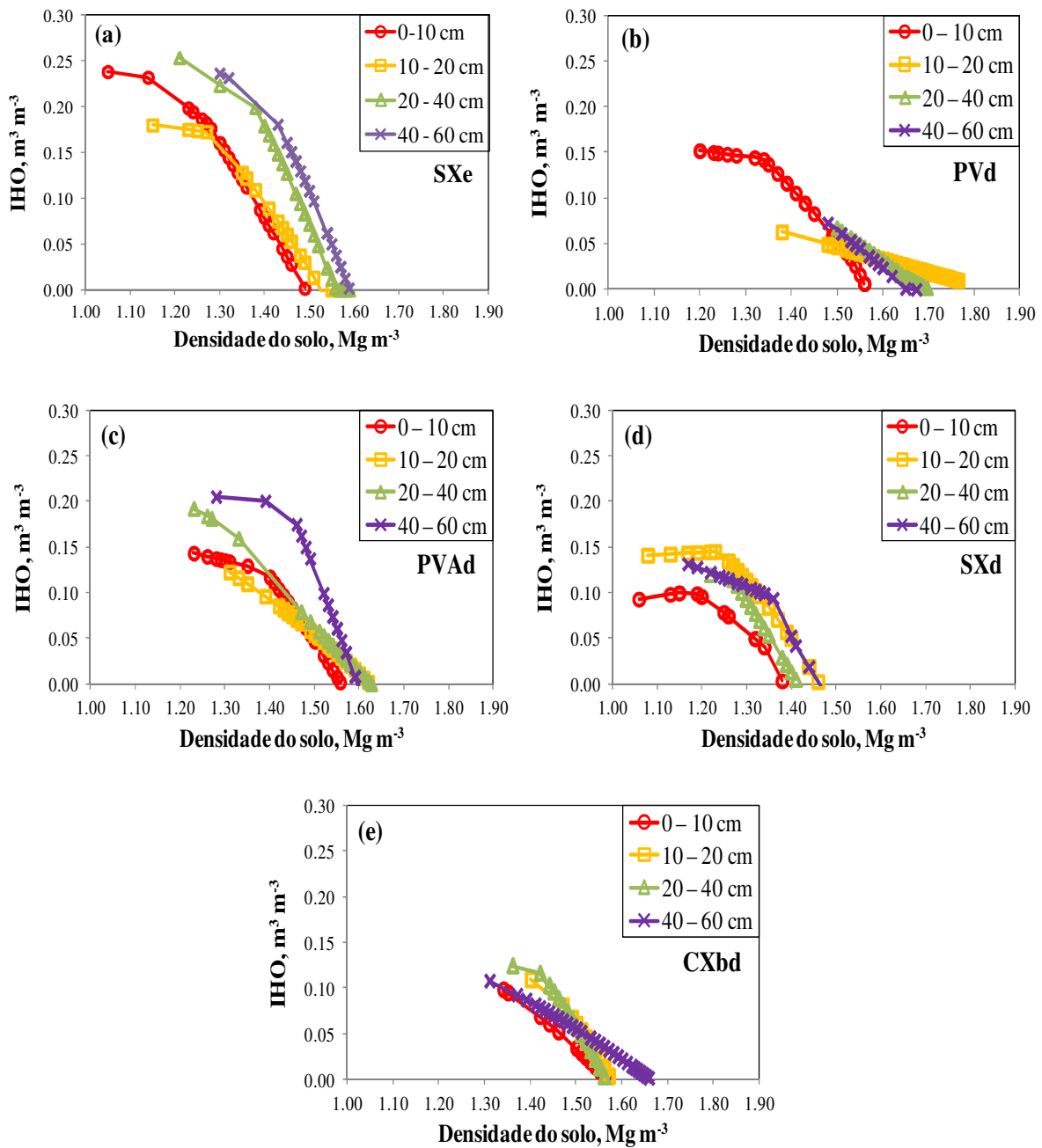


Figura 16 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função da densidade do solo para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.

No SXd, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, a princípio, o IHO aumentou até o valor de Ds de 1,20 e 1,23 Mg m⁻³, respectivamente, sendo essa considerada a densidade benéfica, onde ocorreu aumento da retenção de água do solo (SEVERIANO et al., 2011), uma vez que valores baixos de densidade resultam em valores de condutividade hidráulica insaturada menores, sendo, também, menor o contato solo-raiz, e, por conseguinte, o rendimento de culturas pode ser baixo (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000). Após esses valores de densidade benéfica, o IHO diminuiu em função da curva de resistência do solo (Figura 16d).

Por último, no CXbd, em todas as camadas, o IHO decresceu quase linearmente com o aumento da Ds, em função da θ_{RP} ser o limite inferior em toda ou quase toda variação do IHO (Figura 16e).

O conteúdo de água disponível às plantas (AD), considerado como a diferença entre o valor da θ_{CC} e o valor da θ_{PMP} , no SXe, tendeu a diminuir com o aumento da Ds, porém, nas camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm de profundidade, essa tendência foi mais evidente (Figura 17a).

No PVd (Figura 17b), os valores de AD foram menores se comparados ao SXe. Nas camadas de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm de profundidade, os valores apresentaram tendência decrescente com o aumento da Ds, sendo menor essa tendência na camada de 40 a 60 cm, e não ocorrendo na camada de 10 a 20 cm.

Os valores de AD no PVAd (Figura 17c) a princípio foram um pouco maiores em comparação ao PVd, exceto na camada de 40 a 60 cm, onde os valores foram maiores até em relação ao SXe. Nesta mesma camada, a diminuição do AD em função da Ds seguiu uma tendência mais acentuada em comparação às outras camadas deste solo.

No SXd, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, o aumento de Ds ocasionou aumento da AD, em viés ao observado nas camadas de 20 a 40 e 40 a 60 cm (Figura 17d).

Finalmente no CXbd, pode-se ver que o aumento de Ds teve pouco ou quase nenhuma influência no AD (Figura 17e).

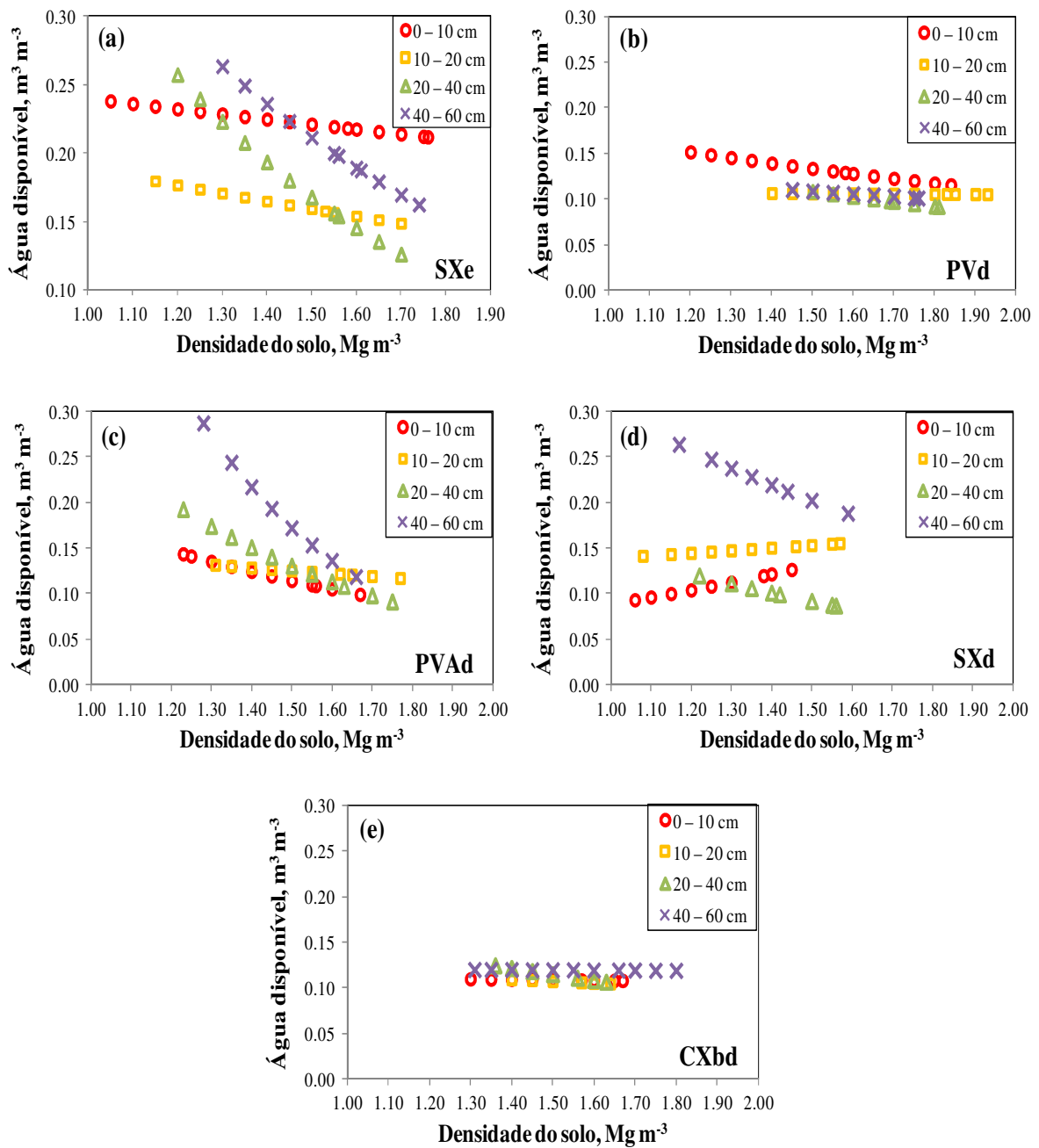


Figura 17 – Variação do conteúdo de água disponível em função da densidade do solo para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.

3.3.2.2 Indicadores de qualidade física e estado de compactação do solo

Como já mencionado, quanto maior o valor de D_s , menor é a magnitude do IHO, e, assim, maior o risco de expor as culturas a condições físicas do solo inadequadas por excesso ou falta de água (SILVA; KAY, 1997). Nesse sentido, a D_s tem se mostrado útil como indicador do estado de compactação (CAMPBELL, 1994), uma vez que apresenta forte

correlação com outras propriedades físico-hídricas dos solos (HORN; FLEIGE, 2003; OLIVEIRA et al., 2007).

Tendo esses pressupostos, a partir dos dados, procurou-se analisar o efeito de diferentes valores de D_s sobre indicadores de qualidade física para as quatro camadas dos cinco solos analisados.

Representando o IHO (RP crítica = 2 MPa) no perfil dos solos em função de diferentes densidades, se pode ver de forma mais clara o efeito da compactação sobre os limites críticos superior e inferior, indicando a faixa de variação de umidade onde as restrições não ocorrem (KLEIN; LIBARDI, 2000; KAISER, 2010).

No SXe, o aumento da D_s reduz a faixa de IHO no perfil do solo rapidamente, sendo menor a magnitude do IHO no intervalo entre 10 a 20 cm de profundidade (Figura 18).

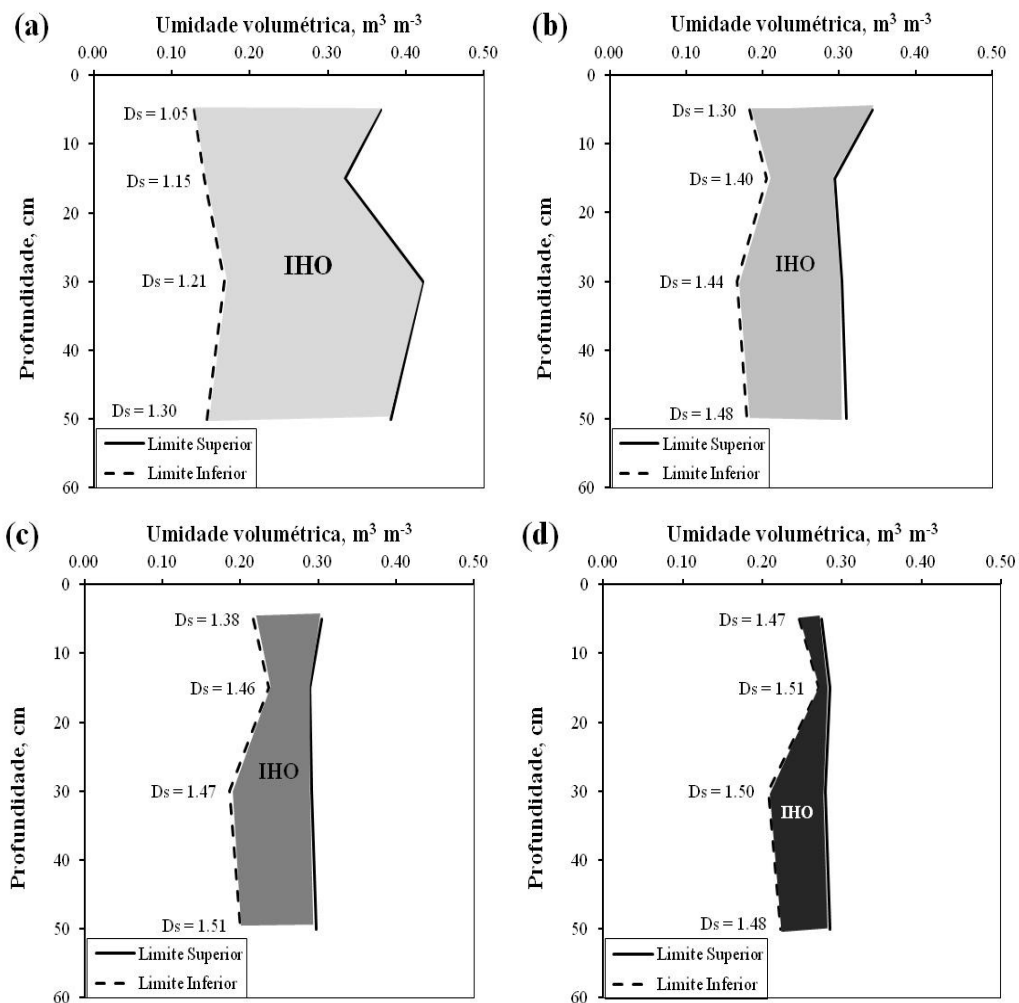


Figura 18 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.

No PVD, a faixa de IHO é menor em comparação ao SXe, sendo que o aumento da D_s reduz a magnitude do IHO, porém, de forma menos abrupta (Figura 19). Isso pode ser atribuído às diferenças texturais dos solos e em função de a variação de D_s ter afetado de maneira maior a retenção de água na θ_{CC} e θ_{PMP} no SXe, do que no PVD, refletindo nas faixas de IHO. Silva et al. (1994), em semelhança, também encontraram diferenças entre um solo de textura franco-arenosa e outro de textura franco-siltosa, sendo que, no segundo, houve maior influência de variação da D_s sobre a retenção de água, em relação ao primeiro.

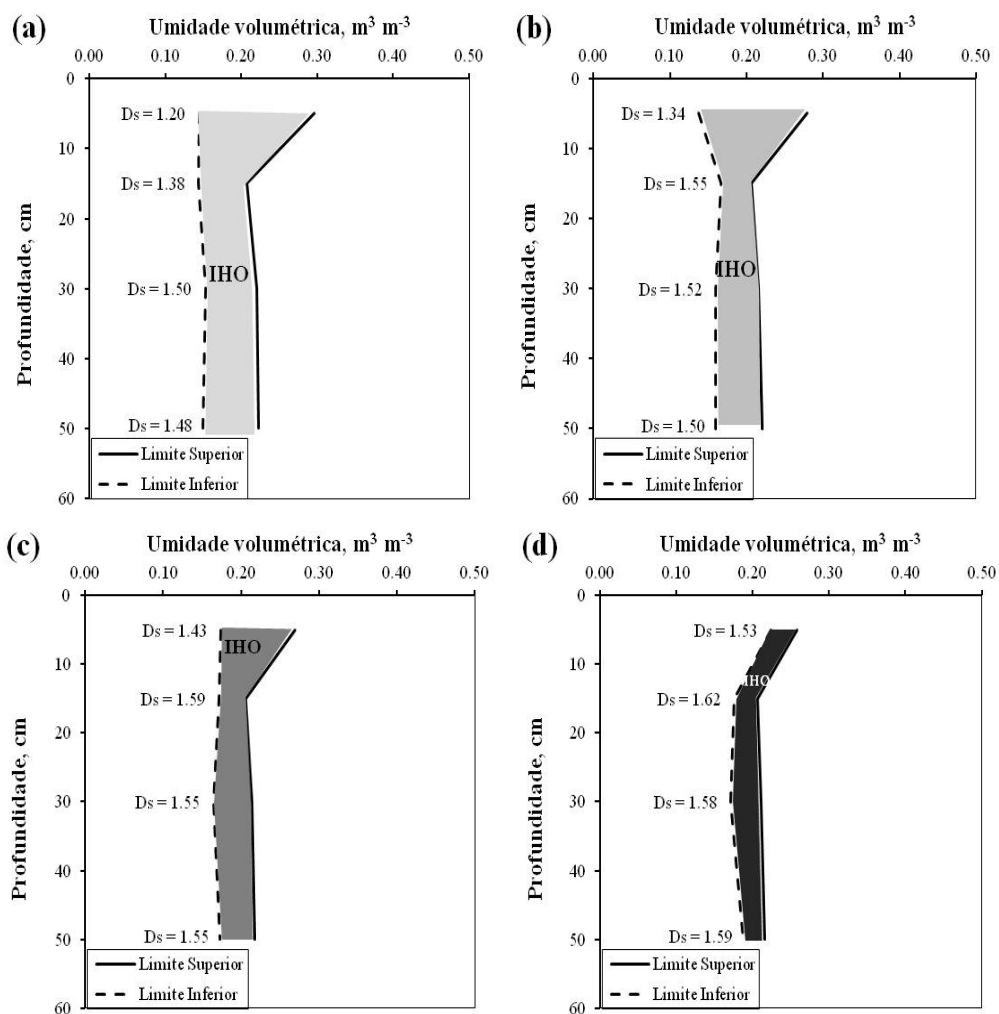


Figura 19 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Argissolo Vermelho Distrófico (PVD); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.

No PVAd, a diminuição do IHO foi acentuada somente da condição de máxima amplitude para a condição de D_s baixa (Figura 20), sendo a faixa do IHO mais estreita, principalmente, nas camadas inferiores.

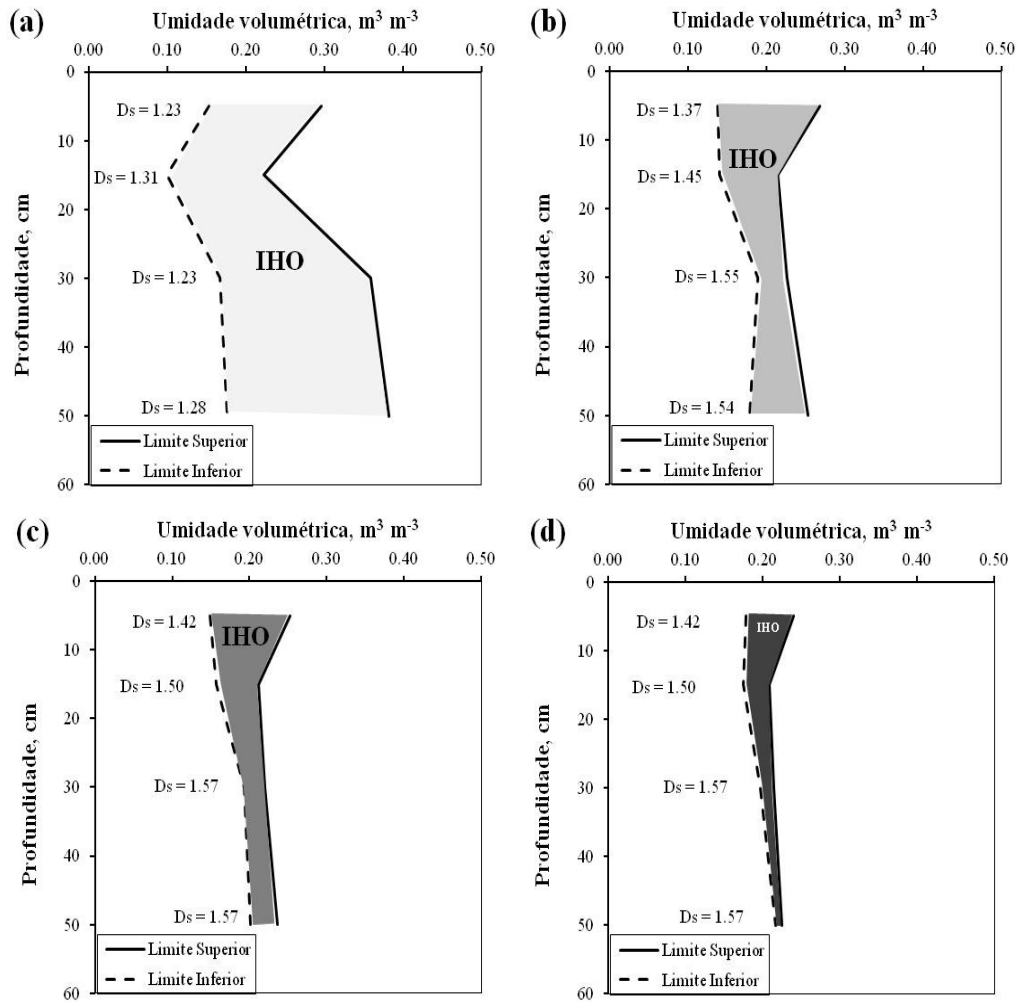


Figura 20 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.

Já no SXd, a redução do IHO, em função das diferentes condições de D_s , ocorre de maneira menos abrupta, contudo, na condição de D_s alta, a faixa do IHO ficou estreitamente reduzida, principalmente, nas camadas inferiores (Figura 21).

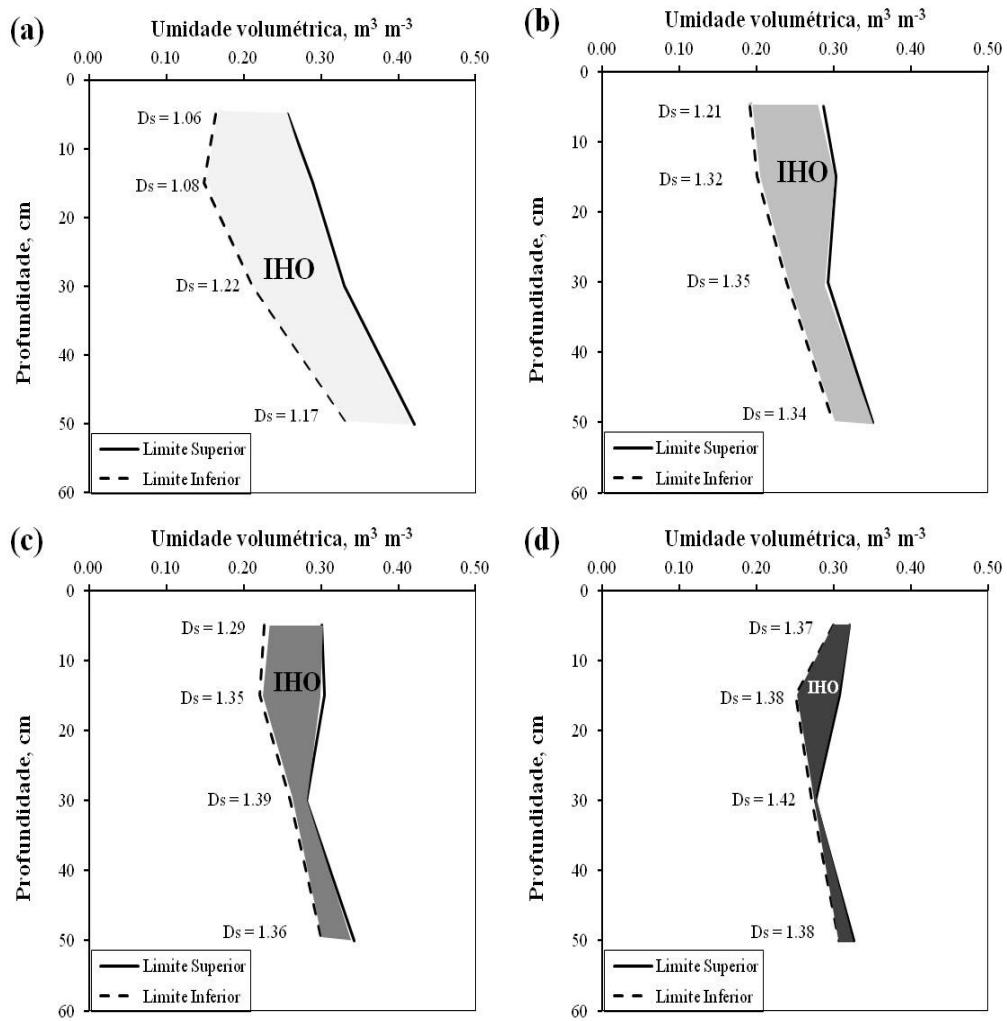


Figura 21 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de Ds baixa; (c) condição de Ds intermediária; (d) condição de Ds alta.

De modo inverso, é observado no CXbd que, em condição de Ds alta, a faixa do IHO no perfil ficou estreitamente reduzida em maior magnitude nas camadas superiores (Figura 22).

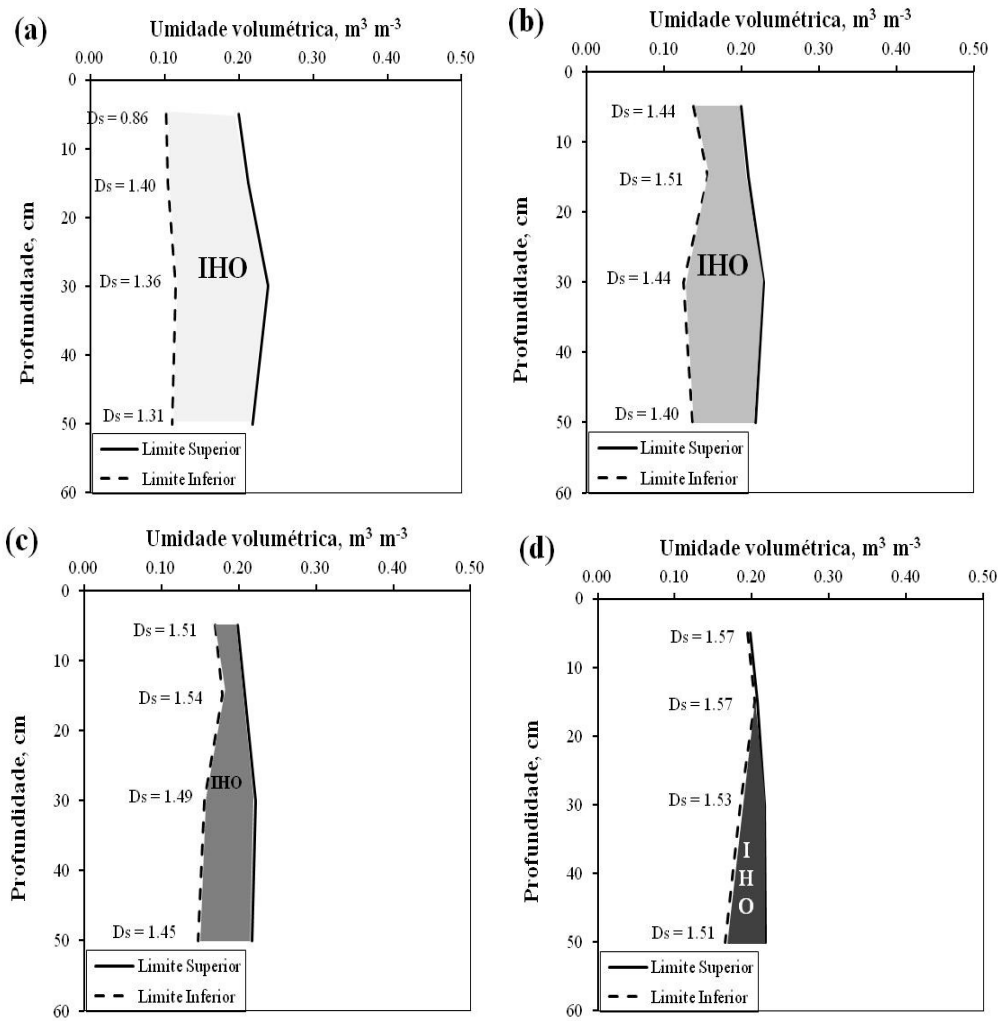


Figura 22 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 2 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) condição de D_s baixa; (c) condição de D_s intermediária; (d) condição de D_s alta.

O efeito de diferentes valores de D_s foi evidente sobre as curvas de retenção de água de todos os solos (Figuras 23, 24, 25, 26 e 27). De acordo com Hillel (1998) e Reichardt e Timm (2004), o efeito da compactação sobre a forma da curva de retenção, primeiramente, é observado em tensões baixas, uma vez que ocorre redução da porosidade total do solo, principalmente, dos poros de maior tamanho (macroporos), sendo, a retenção de água em condição saturada maior. Como o volume de poros de tamanho intermediário (mesoporos) pode aumentar, devido à compressão dos poros maiores, e o volume de poros pequenos (microporos) também, em tensões maiores, a CRA tende a ser maior. Em tensões muito altas, o mecanismo predominante na retenção de água é mais a adsorção do que a capilaridade, e,

assim, a retenção de água ocorre mais em função das características texturais do que estruturais do solo.

No SXe, a retenção de água na camada superficial do solo (0 a 10 cm), em condições saturadas até a tensão de 10 kPa é claramente maior em condição de Ds baixa ($D_s = 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$), em comparação aos outros valores de Ds. Nas tensões acima de 10 kPa, ocorreu o inverso, isto é, a retenção de água foi maior em condição de Ds alta ($D_s = 1,47 \text{ Mg m}^{-3}$). Esse comportamento da CRA indica alterações na distribuição de poros, mostrando, portanto, que diferentes condições de compactação resultaram, diretamente, em diferentes condições estruturais do solo nessa camada. Na camada de 10 a 20 cm, a mesma tendência pode ser vista, porém, em menor proporção. Na camada de 20 a 40 cm o armazenamento de água em saturação nas diferentes Ds inicialmente não difere, depois a retenção de água até a tensão de 10 kPa é maior em condição de menor Ds ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$), como nas outras camadas. Na camada mais profunda de solo, a retenção de água da saturação até a tensão de 70 kPa foi maior em condição de Ds menor ($1,48 \text{ Mg m}^{-3}$), em seguida, nas tensões maiores que 70 kPa, não houve diferenças na retenção entre as diferentes condições de Ds (Figura 23).

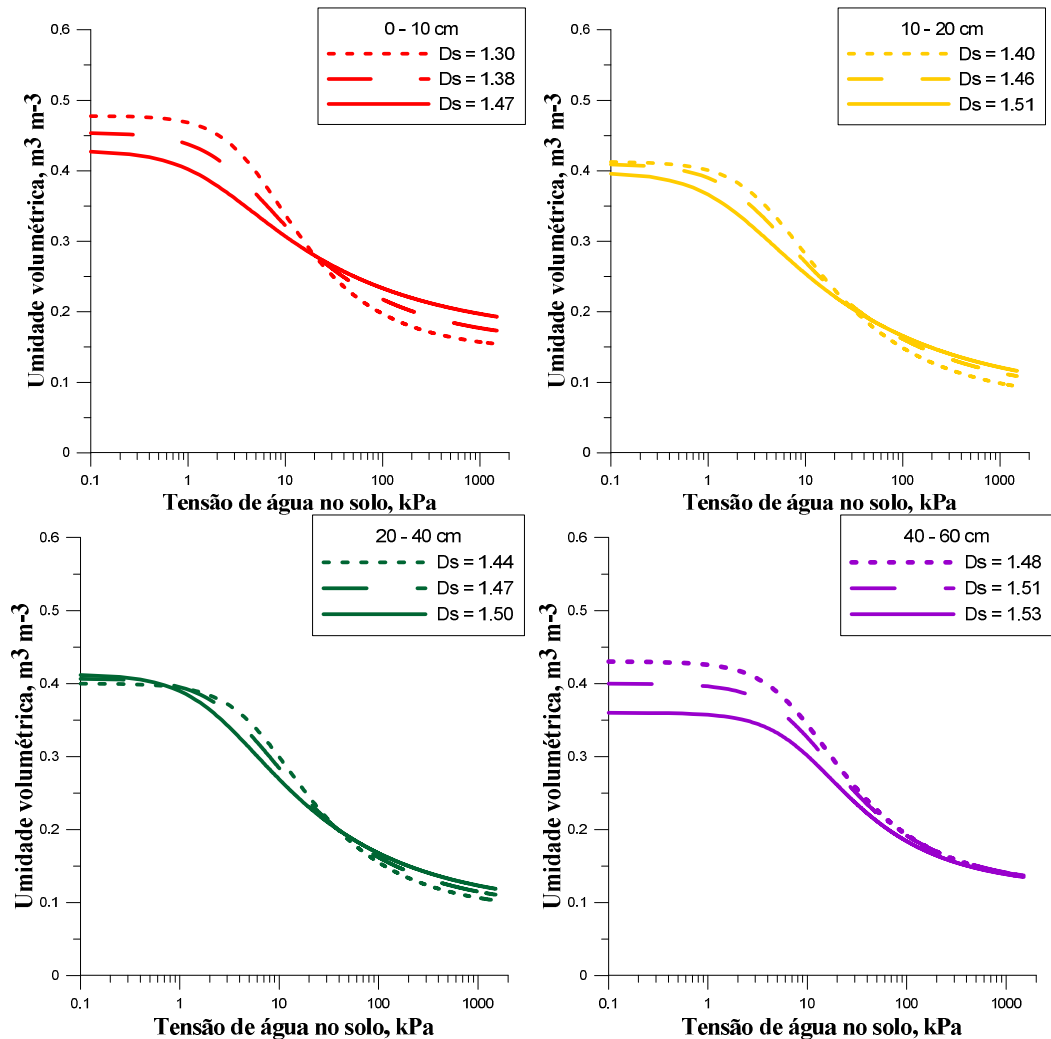


Figura 23 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (D_s) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).

No PVD, na camada de 0 a 10 cm, houve maior retenção de água da saturação até a tensão de 6 kPa, na condição de D_s baixa ($1,34 \text{ Mg m}^{-3}$), prosseguindo com valores de retenção maiores nas densidades intermediária e alta até a tensão de 500 kPa, não havendo diferenças acentuadas de retenção nas tensões subsequentes. Na camada de 10 a 20 cm, os valores da CRA foram praticamente iguais nas diferentes D_s , o que, previamente, já tinha sido visto com os valores de AD. Isto, mais uma vez, indicou que mudanças de D_s nessa camada não alteram a capacidade de retenção de água. A retenção de água nas camadas mais profundas do solo (20 a 40 cm e 40 a 60 cm) apresentou comportamento semelhante. Em ambas, a retenção foi maior em condição de baixa D_s da saturação até próximo da tensão de 100 kPa e, depois, foi maior nas densidades mais altas (Figura 24).

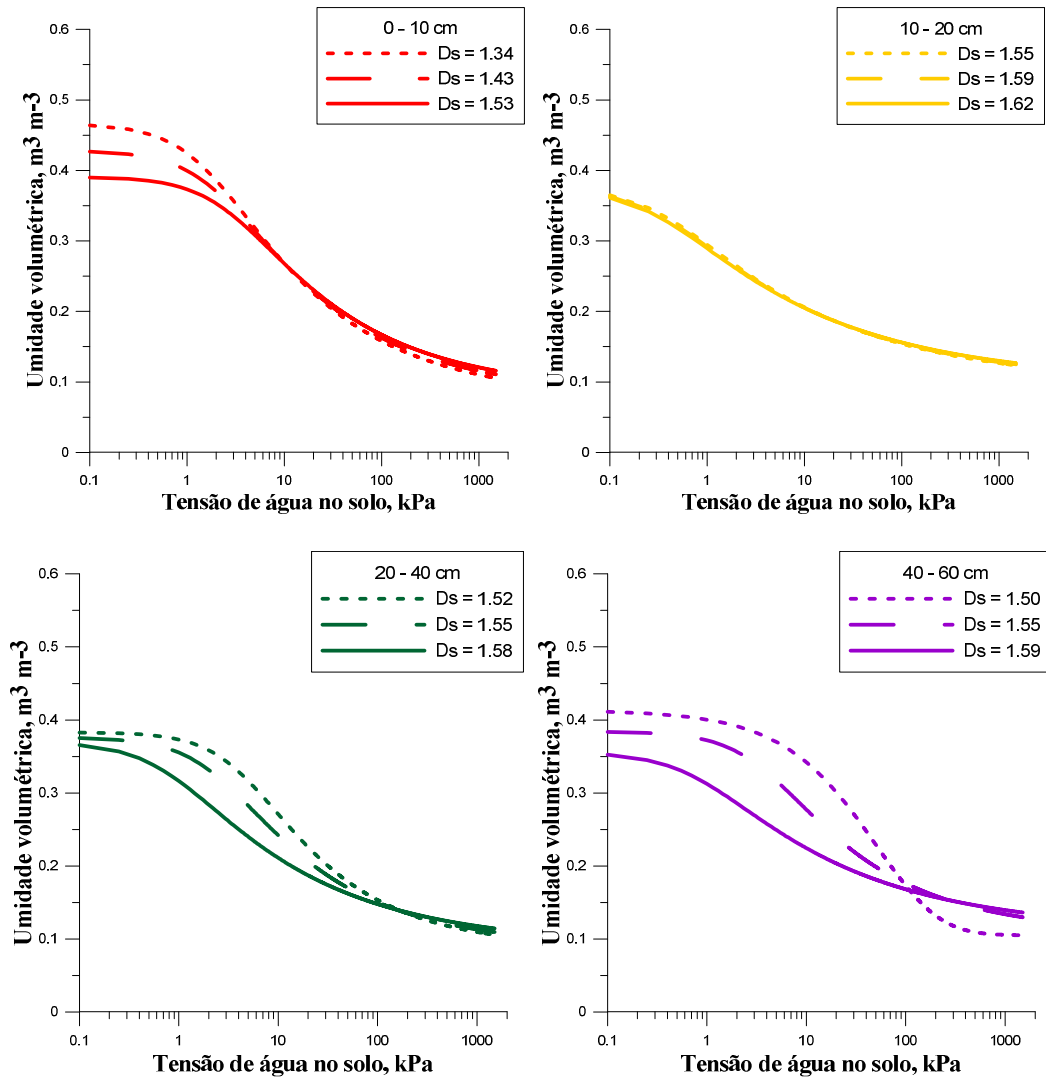


Figura 24 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (D_s) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).

No PVAd, na camada de 0 a 10 cm, a retenção de água foi maior da saturação até a tensão de 10 kPa na condição de D_s baixa ($1,37 \text{ Mg m}^{-3}$), depois, nas tensões maiores, a retenção não teve diferenças acentuadas entre as condições de densidades. Nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm, o comportamento dos valores da CRA, em função dos diferentes valores de D_s , foi semelhante, sendo a retenção maior em condição de baixa D_s da saturação até próxima da tensão de 33 kPa e, depois, foi maior em condição de densidade mais alta. Na camada mais profunda (40 a 60 cm), a retenção de água é maior na condição de D_s baixa ($1,37 \text{ Mg m}^{-3}$) em toda a extensão da CRA (Figura 25).

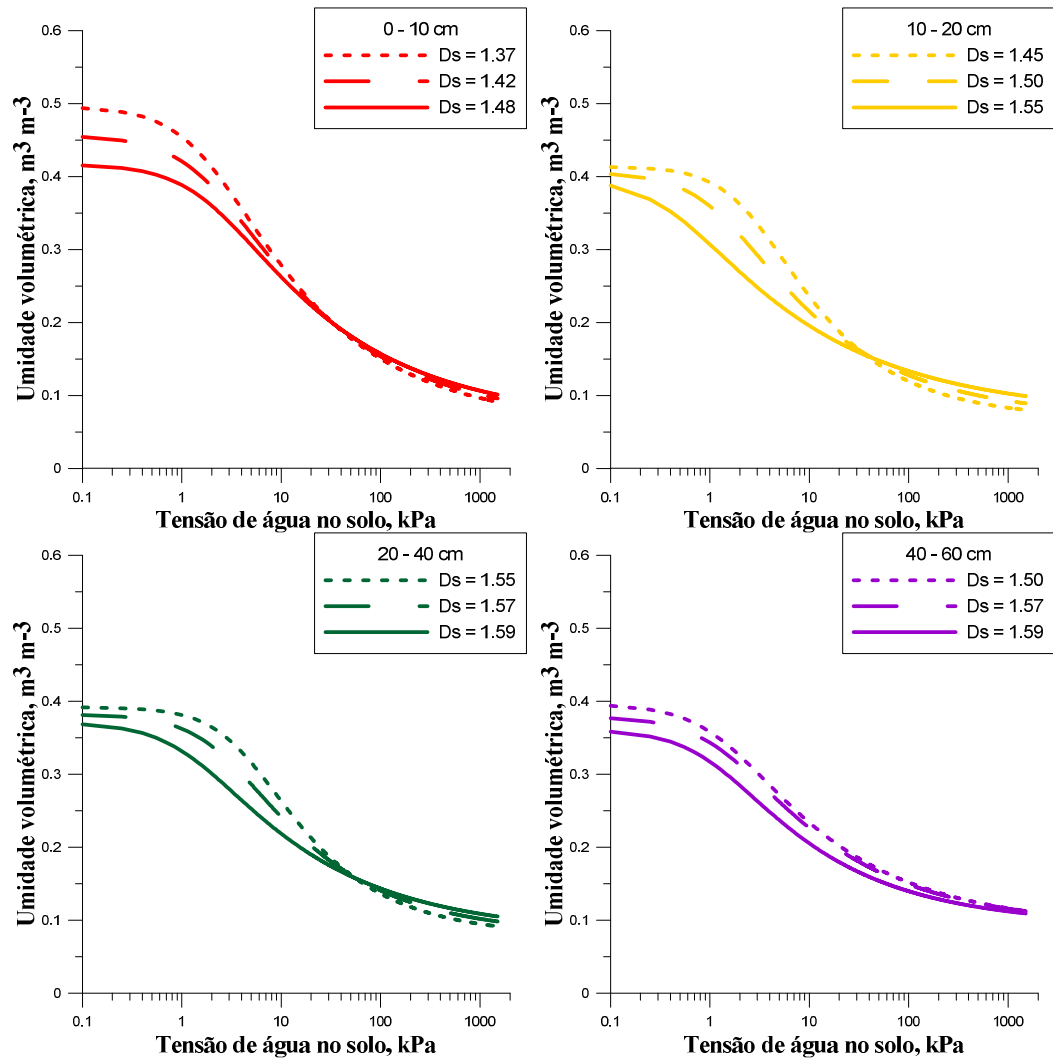


Figura 25 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (D_s) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).

No SXd, na camada superficial do solo (0 a 10 cm), a retenção de água em condições saturadas até a tensão de 33 kPa é claramente maior em condição de D_s baixa ($D_s = 1,21 \text{ Mg m}^{-3}$), sendo maior a partir desta tensão nas densidades maiores. Já as outras camadas deste solo apresentaram comportamento semelhante, não havendo distinções acentuadas de retenção de água em função das diferentes condições de D_s (Figura 26).

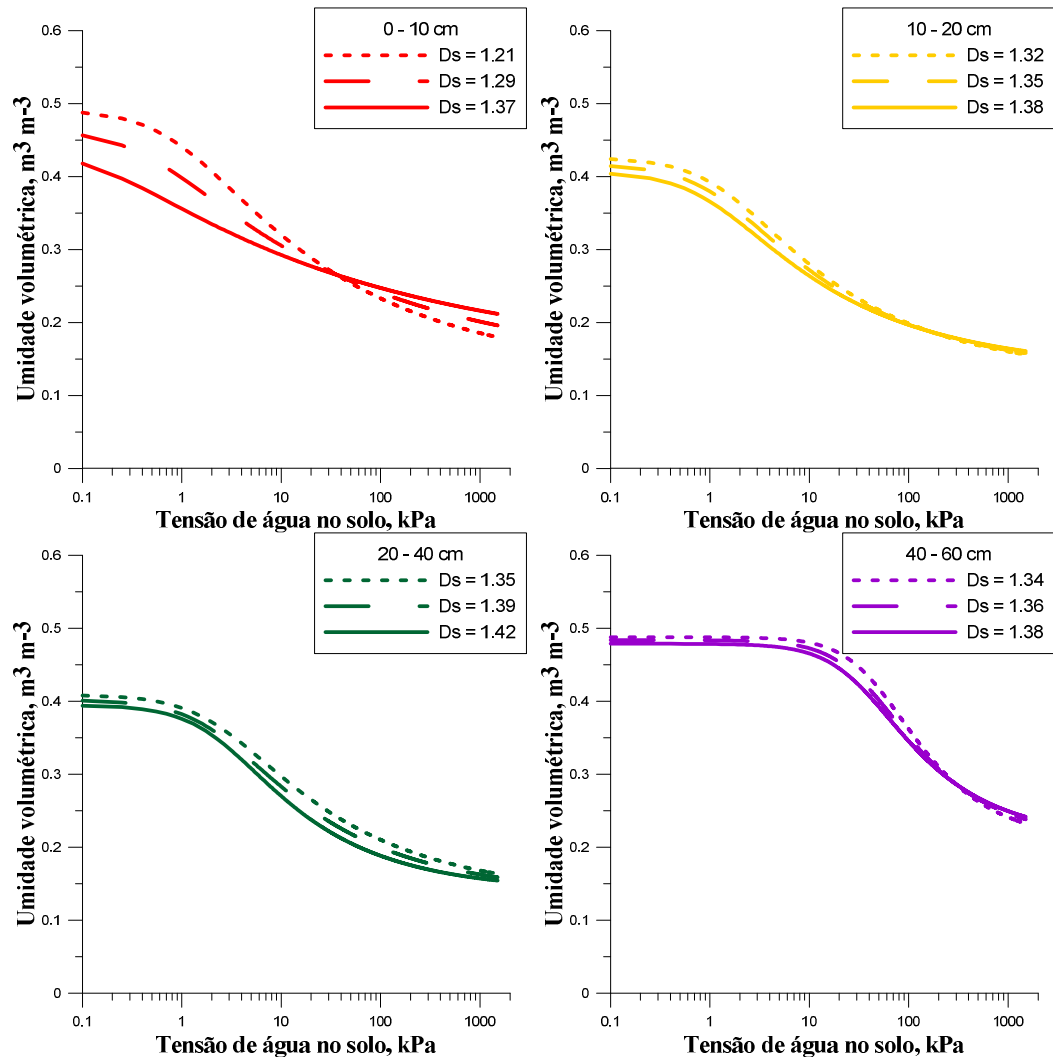


Figura 26 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (D_s) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).

No CXbd, na camada de 0 a 10 cm, a condição de D_s baixa ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$) resultou em retenção maior da saturação até a tensão de 10 kPa, prosseguindo com valores de retenção de água maiores nas densidades intermediária e alta até o final da curva. Na camada de 10 a 20 cm, a retenção na condição de D_s baixa é maior da saturação até a tensão de 33 kPa, não havendo diferenças acentuadas nas tensões maiores. Na camada subsequente (20 a 40 cm), não ocorreram grandes diferenças de retenção em função das diferentes condições de D_s , embora, da condição de saturação até a tensão de 10 kPa, a retenção tenha sido maior em menor densidade do solo. Na camada de 40 a 60 cm, a retenção nas diferentes condições de D_s somente apresenta diferença visível da saturação até em torno da tensão de 1 kPa, sendo maior em condição de D_s igual a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 27).

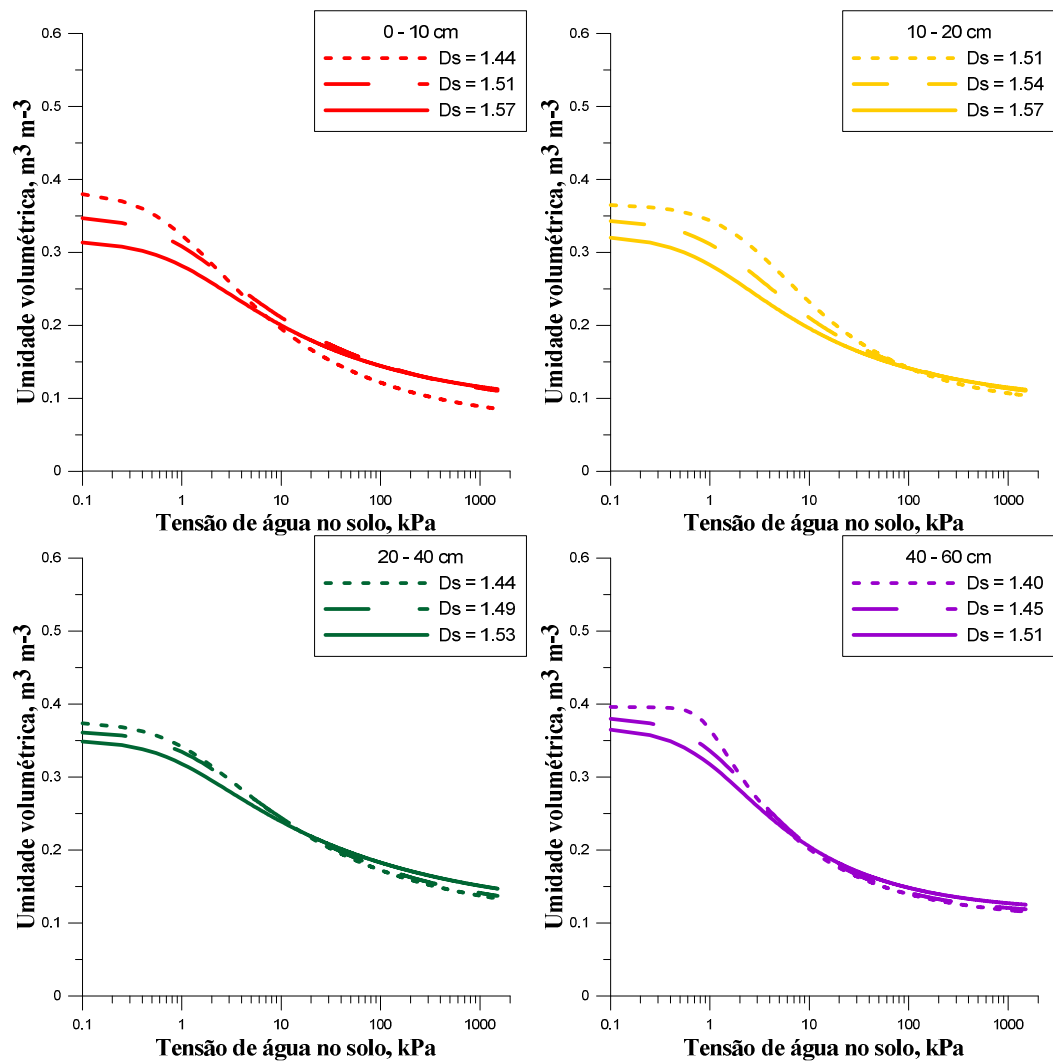


Figura 27 – Curvas de retenção de água em função de três diferentes valores de densidade do solo (D_s) para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd).

Em geral, os Planossolos apresentaram maior retenção de água do que os outros solos. Isso se deve à textura mais fina destes (Tabela 1), uma vez que os fenômenos de retenção são fortemente dependentes da textura. De acordo com Hillel (1998), quanto maior o conteúdo de argila do solo, em geral, maior será a retenção de água e mais gradual será a inclinação da CRA. Em solos com maior conteúdo de areia, grande parte dos poros são relativamente maiores, e uma vez que esses poros são drenados em determinada tensão, apenas uma menor quantidade de água permanece. Além disso, quanto mais fina a textura do solo, mais uniforme é a distribuição do tamanho de poros e mais água é adsorvida, assim, o aumento da tensão de água causa um decréscimo mais gradual na umidade do solo.

No SXe, nas camadas de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm, foram as condições de alta D_s que apresentaram maior proporção de poros com diâmetro acima de 50 μm (Figura

28). Porém, poros desse tamanho são mais associados à condução de água durante a infiltração (KOOEVAAR et al., 1983) e, portanto, não contribuem com a disponibilidade de água para as plantas. Em geral, para todas as camadas, as condições de menor Ds apresentaram maior proporção de poros de 50 a 3 μm , os quais ajudam na redistribuição e disponibilidade de água no solo, sendo que nas condições altas de Ds foi encontrada maior proporção de poros abaixo de 3 μm , nos quais a água começa a ficar fortemente retida na matriz do solo e, conseqüentemente, cada vez mais indisponível às plantas.

No PVd (Figura 29), na camada de 0 a 10 cm, a proporção de poros maiores que 50 μm e entre 50 e 30 μm foi maior na condição de baixa Ds, enquanto que a proporção de poros de 30 μm até abaixo 0,2 μm foi maior nas condições intermediária e de alta Ds. Na camada de 10 a 20 cm de profundidade, as distintas densidades não resultaram em relevantes diferenças no tamanho de poros, o que também foi visto para a AD e CRA. Na camada de 20 a 40 cm, a proporção de poros com diâmetro maior que 50 μm foi maior na condição de alta Ds e a proporção de poros de 50 a 0,2 μm de diâmetro foi maior na condição de baixa Ds. Na camada mais profunda, assim como na camada anterior, a proporção de poros acima de 50 μm foi maior na Ds alta, sendo a proporção de poros entre 50 a 4 μm maior em Ds baixa e a proporção entre 4 a 0,2 μm , maior em condição intermediária de Ds.

No PVAd, a distribuição de tamanho de poros em função de distintas Ds ocorreu de forma similar ao SXe, exceto na camada de 0 a 10 cm, onde, na condição de menor Ds, a proporção de poros foi maior entre os poros com diâmetro acima de 50 μm até 10 μm (Figura 30).

No SXd (Figura 31), nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, condições de baixa Ds resultaram em maior proporção de poros de 50 a 0,3 μm . Na camada de 20 a 40 cm, houve maior proporção de poros com diâmetro acima de 50 até 30 μm em condição de maior Ds, sendo maior a proporção de poros menores que 30 μm em densidade menor. A camada mais profunda deste solo apresentou um comportamento diferente quanto à sua distribuição de poros em relação aos outros solos. A tendência apresentada nos outros solos foi de haver uma percentagem em torno de 20 a 30 % de poros maiores que 50 μm , enquanto na camada deste solo foi em torno de 1 %, havendo maior proporção de poros de diâmetro entre 30 a 0,6 μm . Esse fato pode ser atribuído devido a essa camada apresentar os maiores valores de conteúdo de argila e silte dentre todos os solos (Tabela 1, p. 37), além de, como será discutido em seguida, de ter apresentado maior plasticidade, o que, provavelmente, é advindo de argilominerais 2:1 expansivos, conferindo tal comportamento físico.

No CXbd, em densidades menores houve maior proporção de poros da classe acima de 50 até 10 μm para a camada de 0 a 10 cm. Para a camada de 40 a 60 cm a proporção de poros foi maior, da classe acima de 50 μm até 3 μm , nas densidades menores. Nas camadas intermediárias de profundidade, densidades menores resultaram em proporção de poros entre 50 a 0,2 μm (Figura 32).

Em geral, verifica-se que, dentro das condições estudadas, a influência do estado de compactação sobre os indicadores de qualidade física avaliados variou, em maior ou menor magnitude, em função do tipo de solo e da camada avaliada, uma vez que esses indicadores são fortemente dependentes em relação à composição textural e mineralógica dos solos, demonstrando a importância de seu conhecimento frente ao manejo mais adequado a ser adotado e ao planejamento de operações mecanizadas.

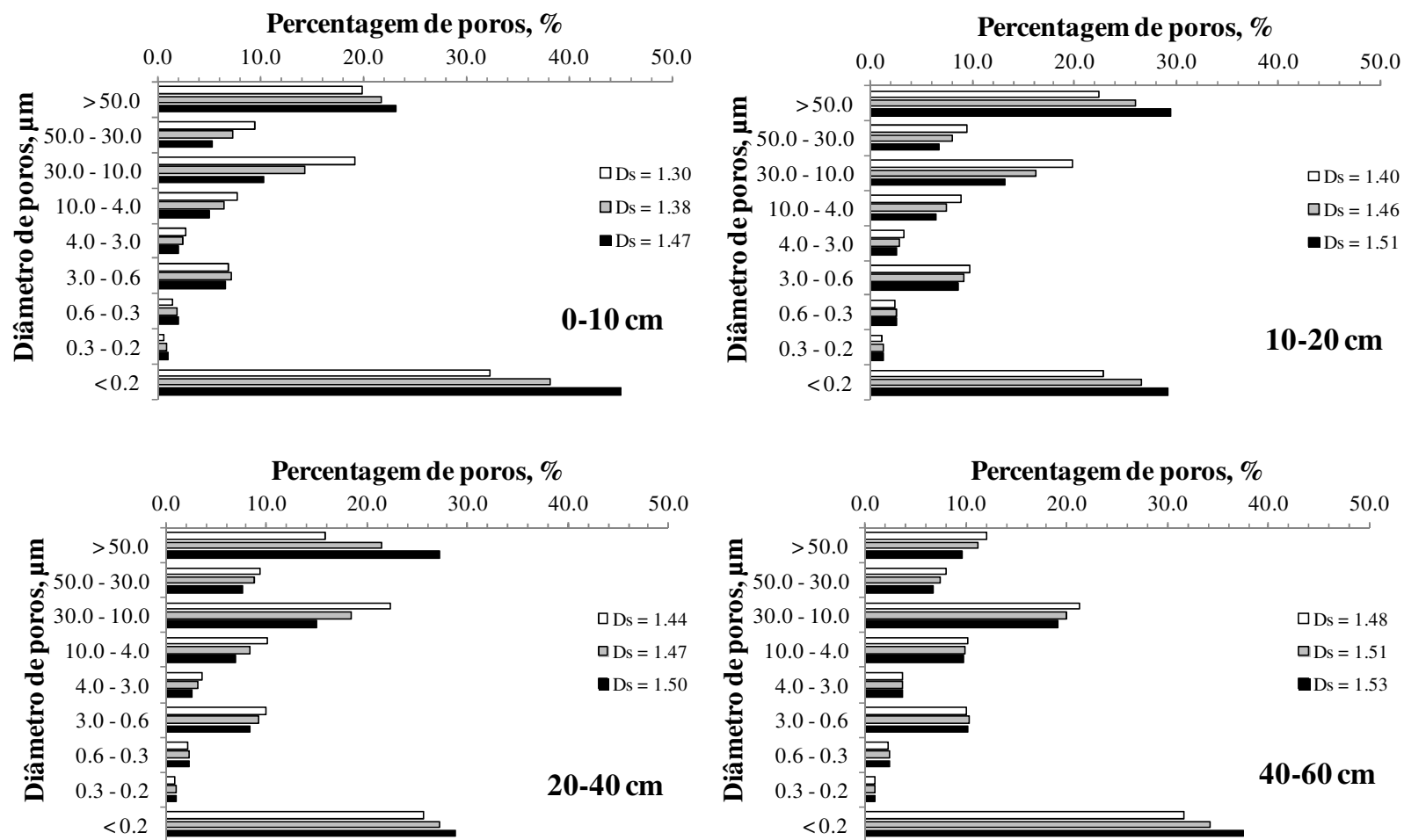


Figura 28 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de três diferentes valores de densidade do solo (Ds) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).

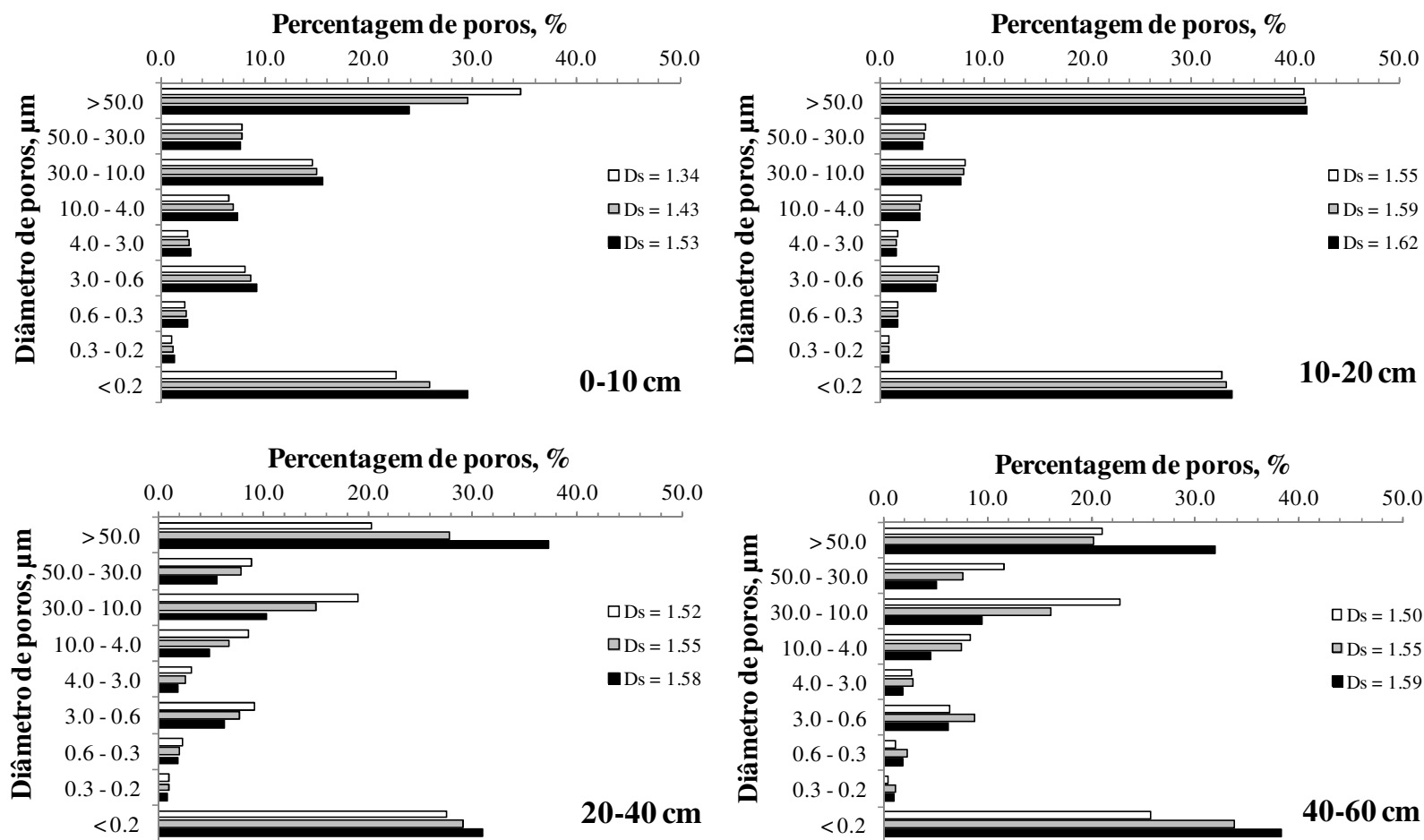


Figura 29 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).

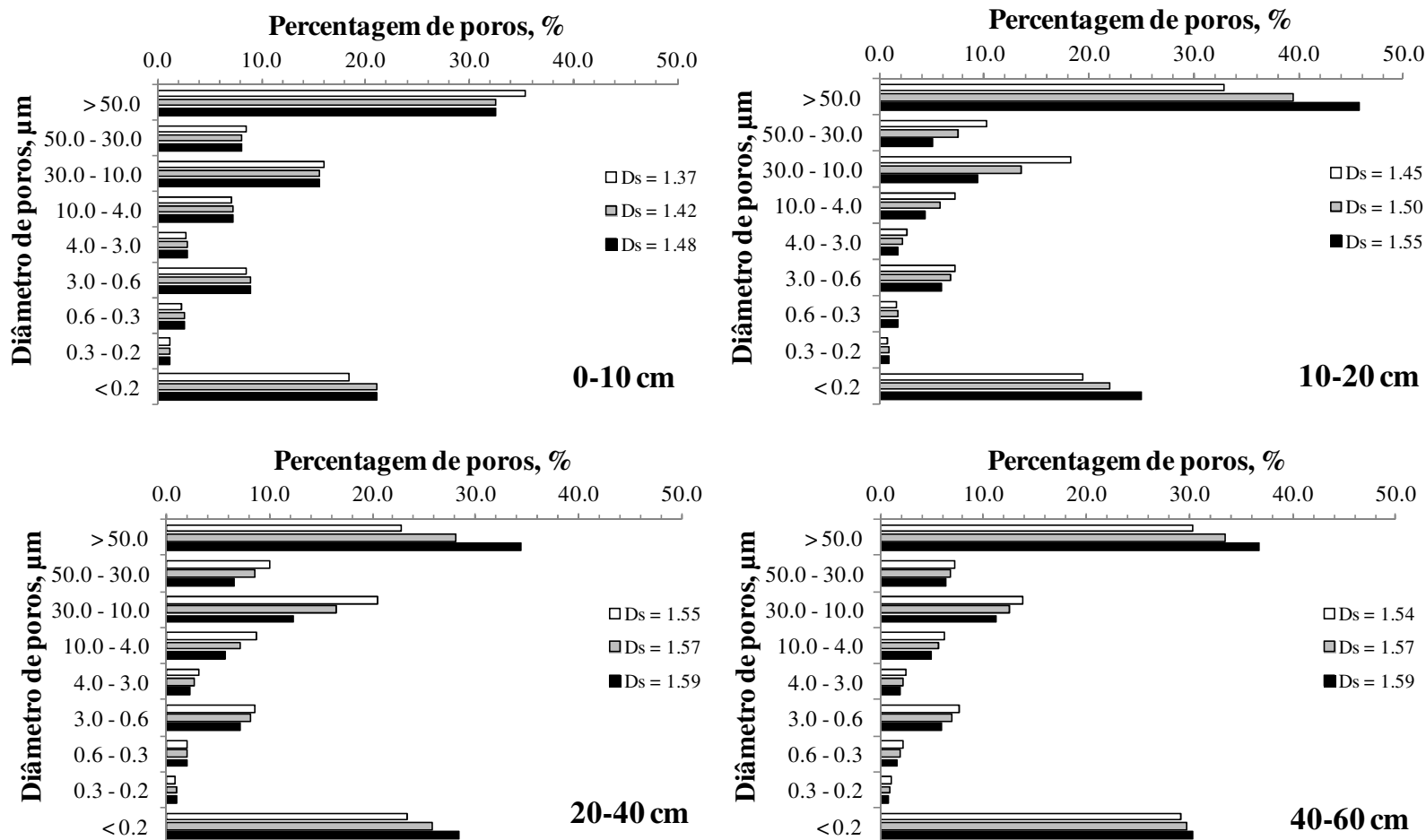


Figura 30 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).

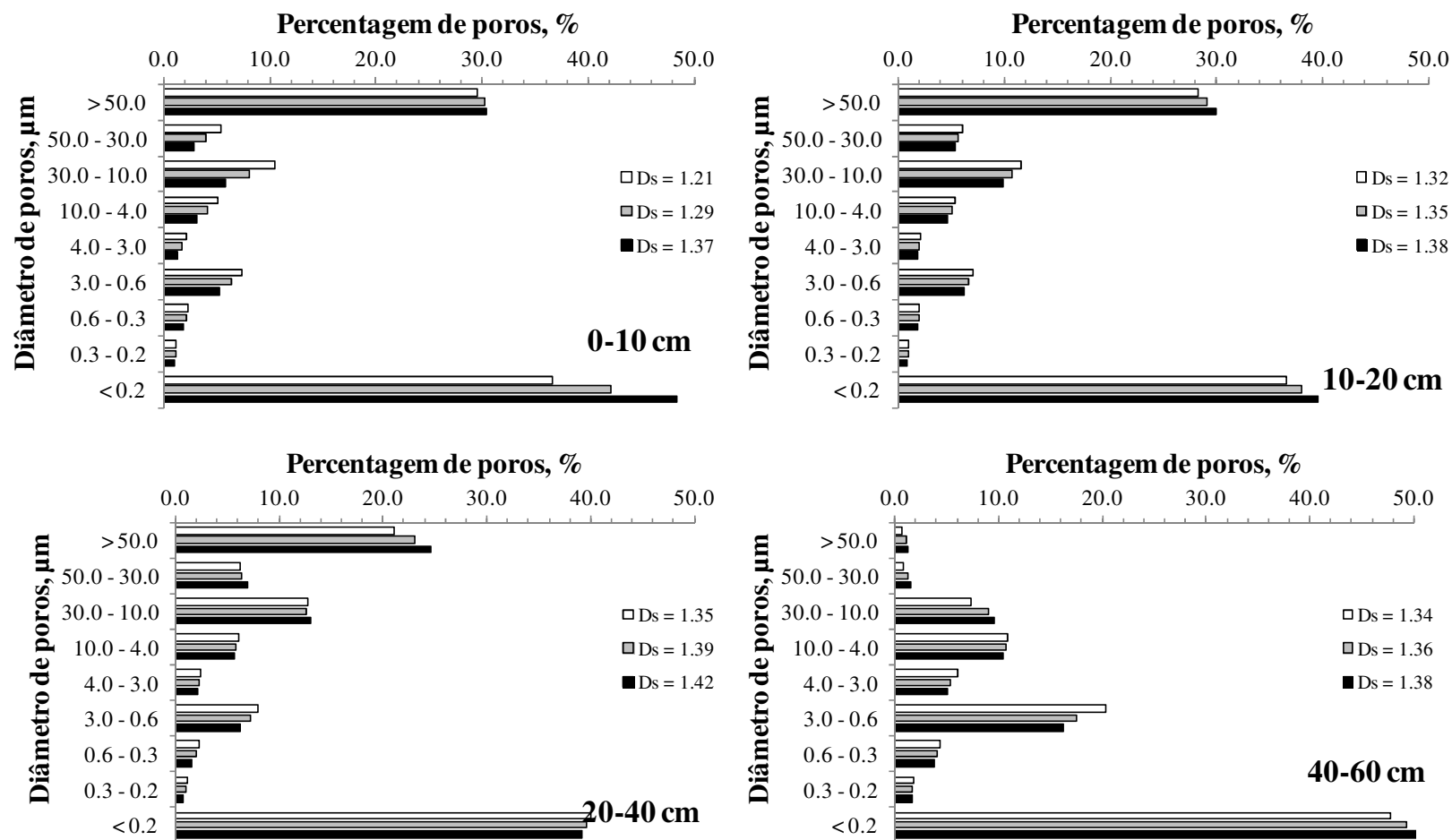


Figura 31 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).

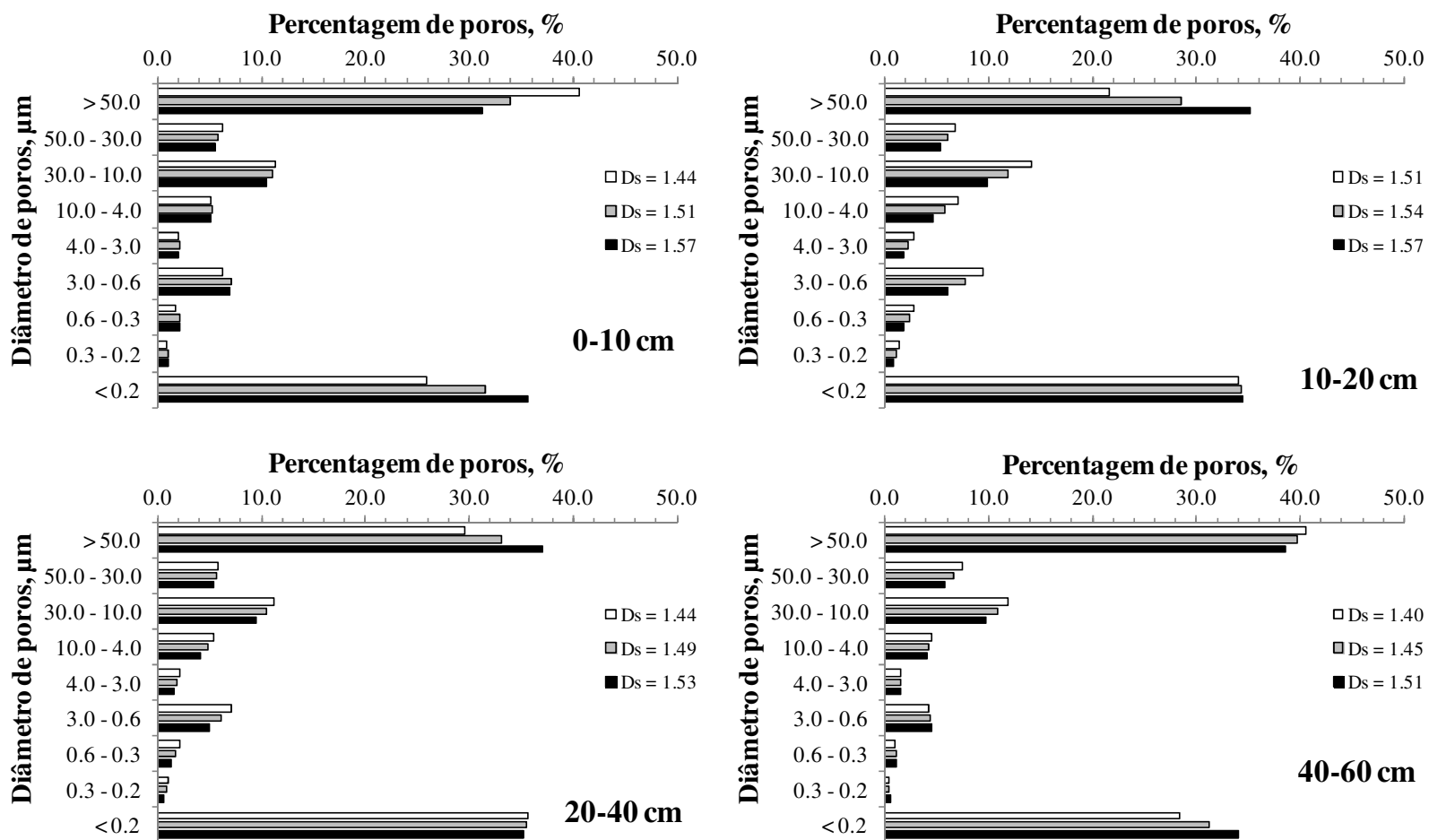


Figura 32 – Distribuição do tamanho de poros em percentagem em função de diferentes valores de densidade do solo para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd).

3.3.3. Indicadores de trafegabilidade do solo

3.3.3.1 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e limites de consistência

As curvas de compactação das quatro camadas dos cinco solos avaliados são apresentadas na Figura 33.

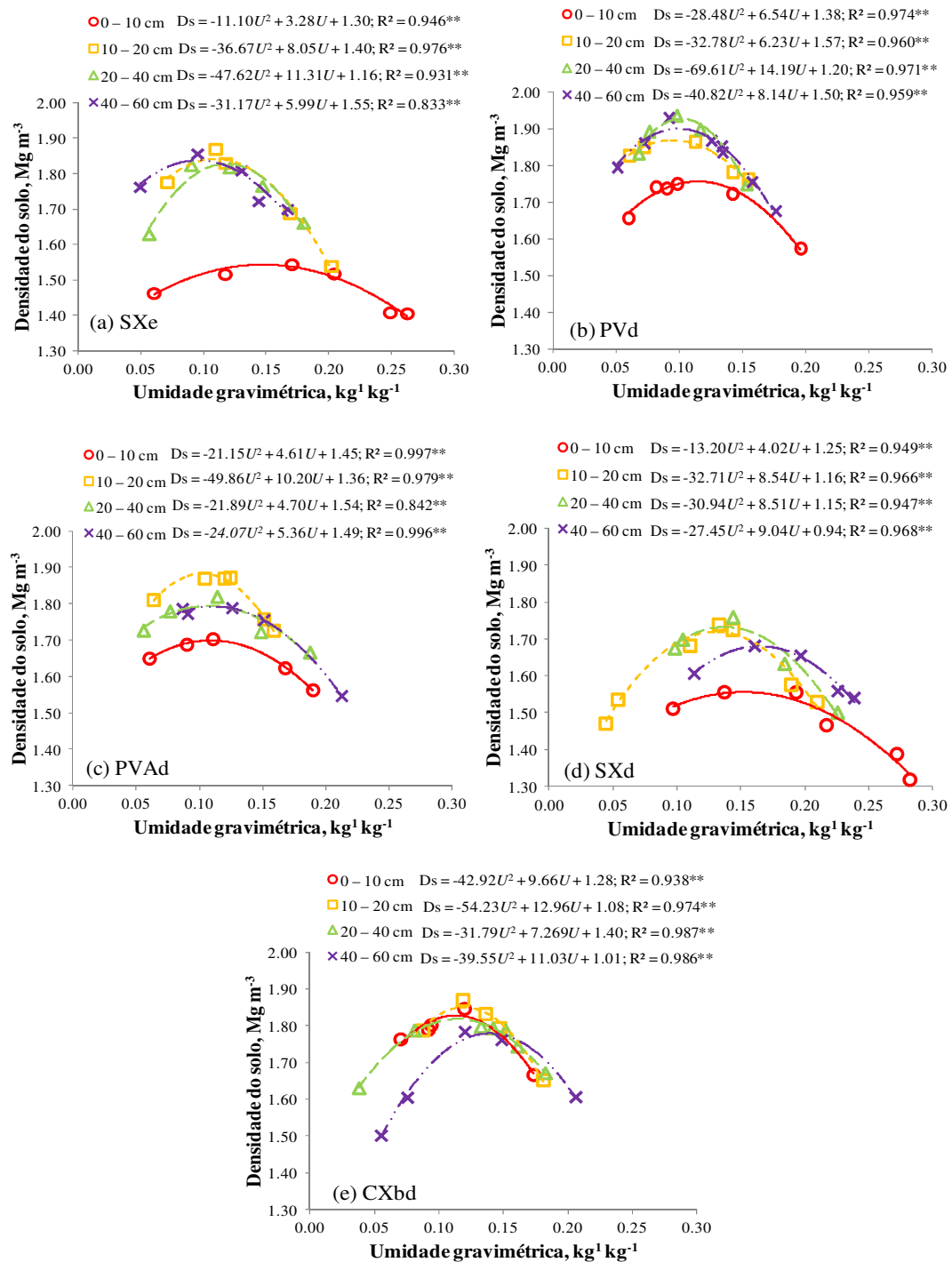


Figura 33 – Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas. R^2 : coeficiente de determinação; ** significativo a 1%.

Pode-se observar que, à medida que a densidade do solo aumenta até atingir um valor máximo (densidade do solo máxima, $D_{S_{MAX}}$), a umidade gravimétrica aumenta, ocorrendo, em seguida, decréscimo da densidade com o aumento da umidade. Isso acontece devido ao fato de que, em condição de baixa umidade, não há água suficiente para formar filmes sobre as partículas do solo. Então, conforme a umidade do solo aumenta, o filme de água expande-se, formando uma película cada vez maior entre as partículas, as quais se orientam de modo a deslizar umas sobre as outras. Depois de atingida a umidade ótima de compactação (U_{OC}), mesmo com o aumento da película de água, ocorre redução da densidade do solo, em função do efeito de diluição da água sobre a concentração das partículas por unidade de volume. Em condições de baixa umidade, o ar age como “mola”; em alta umidade, a água age como “mola”, pois esta apresenta baixa compressibilidade e, estando todos os poros saturados, a compactação é menor (FROEHLICH; McNABB, 1984; DIAS JÚNIOR; ESTANISLAU, 1999; REICHERT et al., 2010).

Analisando-se a curva de compactação em termos práticos, condições de baixa umidade são recomendadas para o tráfego, pois há maior coesão entre as partículas, evitando a elevada compactação do solo. Em condições de alta umidade, a coesão entre as partículas é mínima, sendo a resistência do solo muito pequena às pressões externas, assim, a deformação plástica é o processo dominante, resultando em corte e formação de sulcos no solo, causado pelo rodado das máquinas e, embora a compactação seja menor, pode ocorrer “fechamento” de poros e sua continuidade destruída, levando a problemas em termos de infiltração de água e trocas gasosas (GREACEN; SANDS, 1980; HILLEL, 1998; WILLIAMSON; NEILSEN, 2000; AL-SHAYEA, 2001; REICHERT et al., 2010).

A curva de compactação, no SXe (Figura 33a), teve um R^2 que variou de 0,833 a 0,976, sendo a curva de compactação da camada de 0 a 10 cm, deslocada mais abaixo e à direita em relação às outras camadas, resultando em menor valor de $D_{S_{MAX}}$ ($1,54 \text{ Mg m}^{-3}$) e maior de U_{OC} ($0,148 \text{ kg kg}^{-1}$). O limite de liquidez (LL) variou de 0,207 a $0,357 \text{ kg kg}^{-1}$ (Tabela 6). Todas as camadas apresentaram comportamento plástico, com LP variando de 0,187 a $0,281 \text{ kg kg}^{-1}$ e IP de 0,014 a 0,075, sendo as camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm classificadas como pouco plásticas, segundo intervalo de plasticidade definido por Atterberg (REICHERT et al., 2010) e a camada mais profunda como de plasticidade média.

No PVd (Figura 33b), o R^2 variou de 0,959 a 0,974 e, de modo semelhante ao SXe, a curva de compactação da camada de 0 a 10 cm ficou deslocada mais abaixo e à direita em relação às curvas das outras camadas, ocasionando um valor de $D_{S_{MAX}}$ de $1,76 \text{ Mg m}^{-3}$ e de U_{OC} de $0,115 \text{ kg kg}^{-1}$. O LL variou de 0,180 a $0,197 \text{ kg kg}^{-1}$, sendo maior na camada de 0 a 10

cm. Contudo esta camada, diferentemente das outras, não apresentou comportamento plástico. O LP entre as camadas de 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm variou de 0,170 a 0,178 kg kg⁻¹ e o IP de 0,002 a 0,019, sendo classificadas como pouco plásticas (Tabela 6).

Tabela 6 – Densidade máxima (D_{SMAX}), umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e intervalo de plasticidade por Atterberg para os cinco tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.

Solo	Camada (cm)				Camada (cm)			
	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
	Densidade do solo máxima (Mg m ⁻³)				Umidade ótima de compactação (kg kg ⁻¹)			
SXe	1,54	1,84	1,83	1,84	0,148	0,110	0,119	0,096
PVd	1,76	1,87	1,93	1,90	0,115	0,095	0,102	0,100
PVAd	1,70	1,89	1,79	1,79	0,109	0,102	0,107	0,111
SXd	1,56	1,72	1,73	1,68	0,152	0,131	0,138	0,165
CXbd	1,83	1,85	1,82	1,78	0,113	0,120	0,114	0,139
	Limite de liquidez (kg kg ⁻¹)				Limite de plasticidade (kg kg ⁻¹)			
SXe	0,257	0,207	0,207	0,357	0,221	0,193	0,187	0,281
PVd	0,197	0,180	0,191	0,190	-*	0,178	0,174	0,170
PVAd	0,192	0,179	0,160	0,171	0,188	-	0,156	0,167
SXd	0,326	0,283	0,291	0,484	0,265	0,255	0,221	0,295
CXbd	0,154	0,147	0,174	0,212	-	-	0,157	0,173
	Índice de plasticidade				Relação U_{OC}/LP			
SXe	0,036	0,014	0,020	0,075	0,83	0,65	0,65	0,31
PVd	-	0,002	0,017	0,019	-	0,56	0,65	0,56
PVAd	0,004	-	0,004	0,007	0,58	-	0,68	0,57
SXd	0,057	0,062	0,059	0,146	0,69	0,63	0,63	0,58
CXbd	-	-	0,017	0,036	-	-	0,73	0,80

SXe: Planossolo Háplico Eutrófico; PVd: Argissolo Vermelho Distrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; SXd: Planossolo Háplico Distrófico gleissólico; CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico; *não apresentou comportamento plástico.

No PVAd (Figura 33c), o R^2 variou de 0,842 a 0,997, também sendo a curva da camada superficial deslocada mais abaixo em relação às outras, sendo o valor de D_{SMAX} de 1,70 Mg m⁻³ e de U_{OC} de 0,109 kg kg⁻¹. O LL variou de 0,160 a 0,192 kg kg⁻¹, sendo maior na camada de 0 a 10 cm. A camada de 10 a 20 cm não apresentou comportamento plástico e o LP entre as outras camadas variou de 0,156 a 0,188 kg kg⁻¹, o IP de 0,004 a 0,007, sendo classificadas como pouco plásticas (Tabela 6).

No SXd (Figura 33d), o R^2 variou de 0,947 a 0,968, sendo a curva da camada de 0 a 10 cm também deslocada mais abaixo em relação às outras, resultando no valor de $D_{S_{MAX}}$ de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$ e de U_{OC} de $0,152 \text{ kg kg}^{-1}$. Como este solo, provavelmente, tem em sua fração textural a presença de argilominerais 2:1 expansivos, que proporcionam maior retenção de água, principalmente nas camadas mais profundas, os valores de U_{OC} , LL, LP e IP foram os maiores entre todos os solos avaliados. O LL variou de 0,283 a $0,484 \text{ kg kg}^{-1}$, sendo maior na camada de 40 a 60 cm. O LP variou de 0,221 a $0,295 \text{ kg kg}^{-1}$ e IP de 0,057 a 0,146, sendo as camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm classificadas como pouco plásticas e a camada de 40 a 60 cm como de plasticidade média (Tabela 6).

Por fim, no CXbd (Figura 33e), o R^2 variou de 0,938 a 0,987 e, em distinção aos outros solos, foi a curva da camada mais profunda que ficou deslocada mais abaixo em relação às outras, devendo-se isso ao maior conteúdo de argila e silte da camada, sendo o valor de $D_{S_{MAX}}$ de $1,78 \text{ Mg m}^{-3}$ e de U_{OC} de $0,139 \text{ kg kg}^{-1}$. Em comparação aos outros solos, este solo apresentou, em geral, os menores valores de U_{OC} , LL, LP e IP, devido a apresentar maior conteúdo de areia, que retêm menor quantidade de água (HILLEL, 1998). O LL variou de 0,147 a $0,212 \text{ kg kg}^{-1}$, sendo maior na camada de 40 a 60 cm. As camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm não apresentaram comportamento plástico. O LP e o IP nas camadas de 20 a 40 e 40 a 60 cm foi de 0,157 e $0,173 \text{ kg kg}^{-1}$, e 0,017 e 0,036, respectivamente, sendo classificadas como pouco plásticas (Tabela 6).

Os Planossolos, em geral, apresentaram menores valores de $D_{S_{MAX}}$ e maiores valores de U_{OC} , LL, LP e IP, sendo isso devido a eles apresentarem textura mais fina do que os Argissolos e Cambissolo (Tabela 1, p. 37), uma vez que a textura influencia diretamente estas propriedades (Figura 34).

A relação entre o conteúdo de argila e $D_{S_{MAX}}$ foi negativa, porém, não apresentou significância, entrando em contradição com os resultados de Silva et al. (1986), Smith et al. (1997b), Mentges et al. (2007), e Marcolin e Klein (2011). Resultados semelhantes foram encontrados por Zhao et al. (2008), que estudaram 33 sítios de solos florestais no Estado da Colúmbia Britânica, Canadá.

Com os outros atributos, a $D_{S_{MAX}}$ apresentou relação significativa somente com o conteúdo de silte ($r = -0,59$) (Figura 34b), com os conteúdos de argila mais silte somados ($r = -0,46$) (Figura 34c) e com o conteúdo de carbono orgânico ($r = -0,61$) (Figura 34f), sendo esta a correlação mais forte em comparação com os outros atributos.

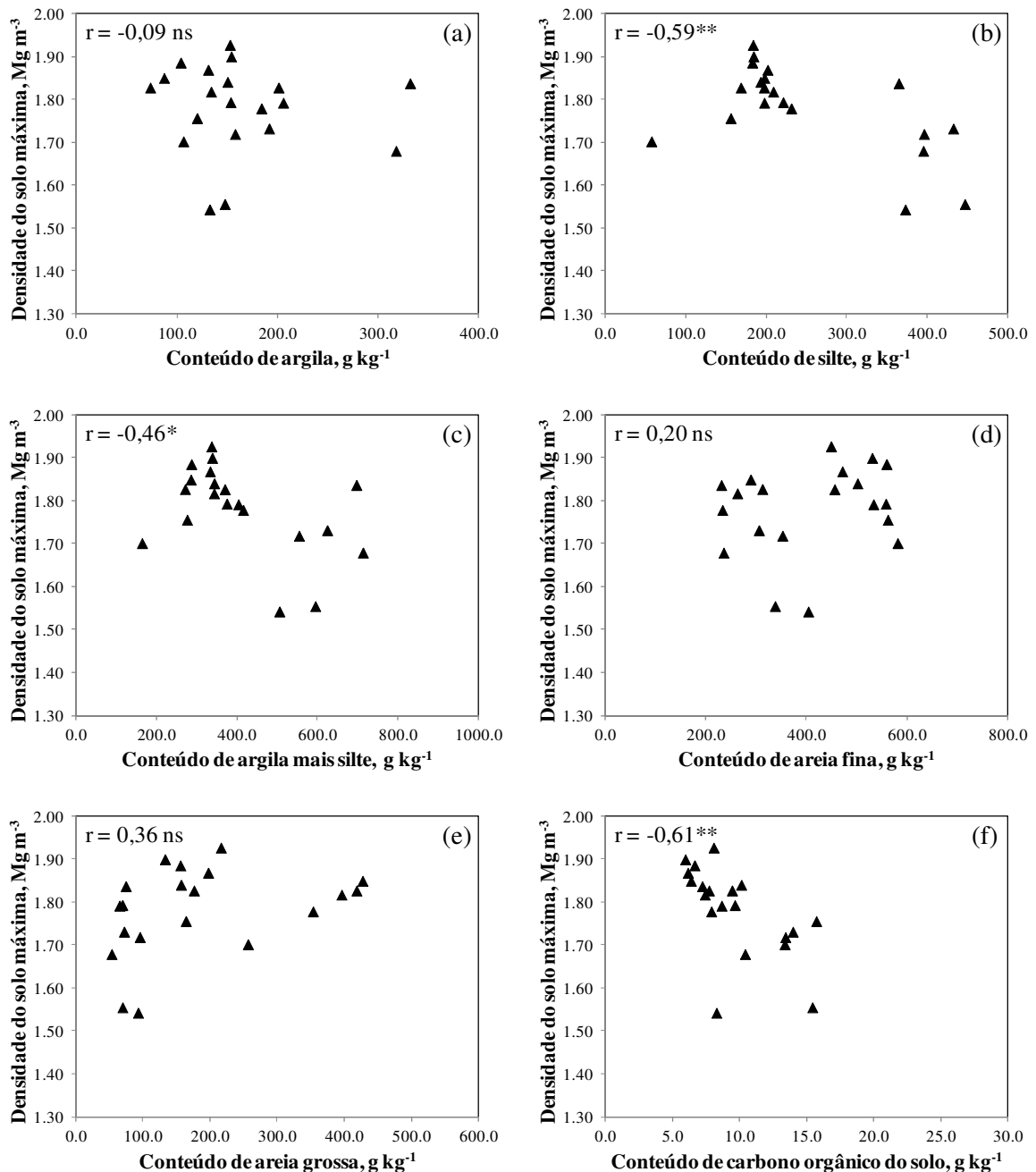


Figura 34 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo máxima com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

Essa última relação ($D_{s\text{máx}}$ e C-org) também foi reportada em diversos trabalhos (SILVA et al., 1986; SOANE, 1990; SMITH et al., 1997b; ZHANG et al., 1997; DIAS JÚNIOR; ESTANISLAU, 1999; BRAIDA, 2004; KRZIC et al., 2004; MENTGES et al., 2007; MARCOLIN; KLEIN, 2011). A matéria orgânica afeta o processo de compactação de duas maneiras: primeiro por meio do aumento do contato entre as partículas do solo,

causando, assim, efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, aumentando sua resistência à compactação; e, segundo, por apresentar baixa densidade em comparação aos sólidos minerais do solo, reduzindo a densidade do solo (SOANE, 1990; SILVA et al., 2010).

No caso de solos com textura mais arenosa, o efeito da matéria orgânica em reduzir a atuação da água como lubrificante entre as partículas minerais é muito maior do que em solos argilosos. Isso ocorre em função de a matéria orgânica possuir capacidade de retenção de água muito maior do que a da areia. Assim, a água acaba ficando concentrada próximo às partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia, enquanto que em solos argilosos, as diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais da fração de argila são menores. Nesses últimos, a interação entre fração mineral e orgânica é maior, resultando em menor disponibilidade de matéria orgânica para interagir com a água do solo (BRAIDA, 2004).

A U_{OC} , da mesma forma que a $D_{S_{MAX}}$, não apresentou relação significativa com o conteúdo de argila (Figura 35a). Já a relação com o conteúdo de silte foi a mais forte entre os atributos ($r = 0,68$) (Figura 35b). Com os conteúdos de argila mais silte somados, a relação foi positiva ($r = 0,59$) (Figura 35c), porém, mais fraca se comparada somente com o conteúdo de silte. Com o conteúdo de areia fina, a relação foi negativa e significativa ($r = -0,51$) (Figura 35d), enquanto que, com o conteúdo de areia grossa não houve significância (Figura 35e). Por fim, com o conteúdo de carbono orgânico (Figura 35f), a relação também se mostrou positiva e significativa ($r = 0,45$).

No que diz respeito ao LL, a relação foi mais forte com os conteúdos de argila mais silte somados ($r = 0,85$) do que com os outros atributos, o que também ocorreu para o LP, sendo que ambos os limites de consistência, apresentaram relação maior com o conteúdo de argila, do que com o conteúdo de silte (Figura 35).

A consistência do solo e seus limites são determinados pelas relações entre as partículas minerais e orgânicas sólidas e dessas com a água, que resultam nas forças de coesão e de adesão (BRAIDA, 2004; REICHERT et al., 2010). Assim, o fato de a argila ter apresentado maior relação com o LL e LP do que o silte ocorre em função da argila apresentar maior área de superfície específica e capacidade de troca de cátions do que o silte, o que, nos fenômenos de consistência, torna a argila mais reativa do que o silte, sendo, portanto, capaz de interagir mais com a água, diminuindo seu efeito lubrificante entre as partículas minerais e, também, ocasionando maior coesão entre as partículas do solo (HILLEL, 1998).

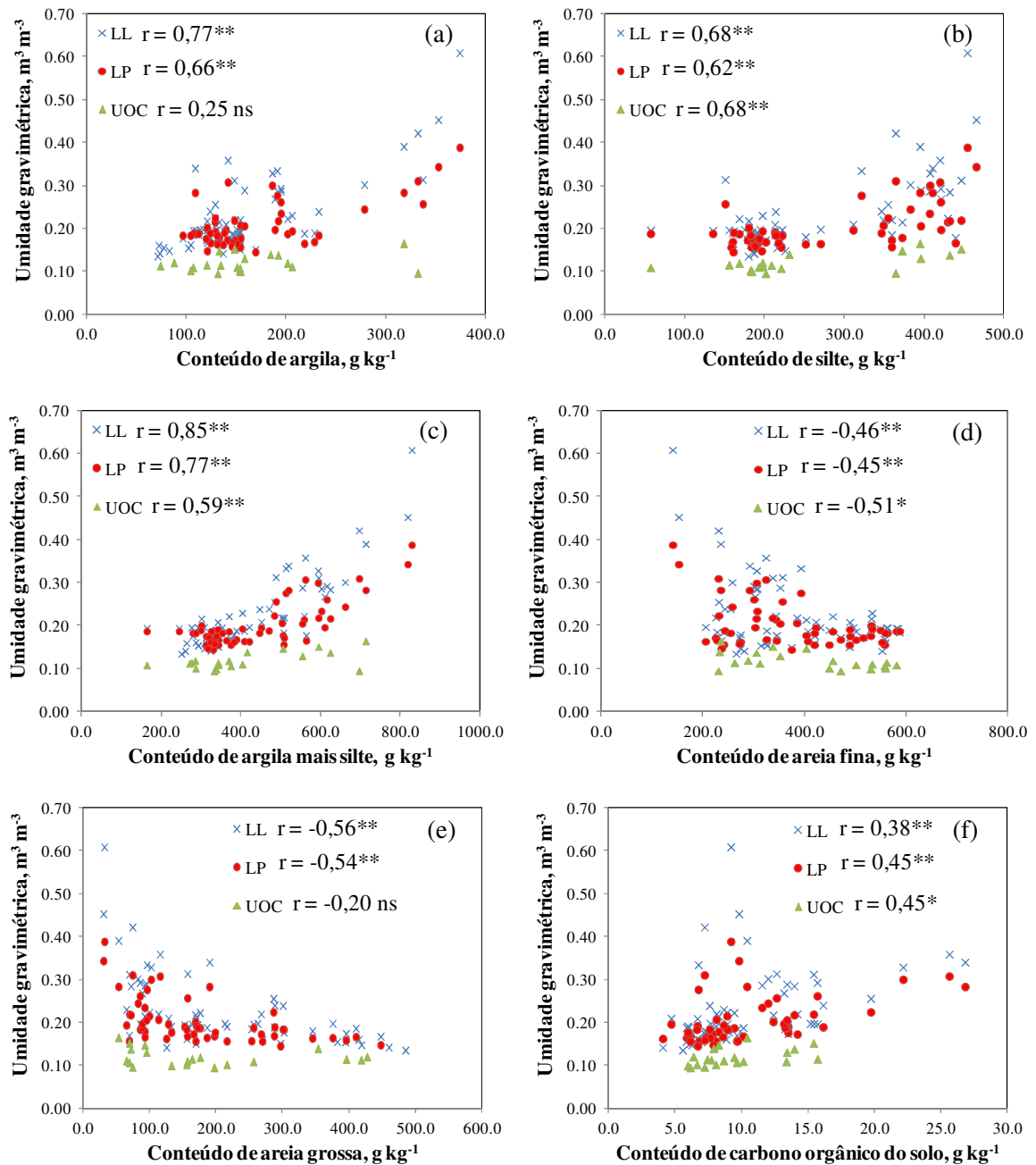


Figura 35 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

Isso também é válido para diferentes tipos de argilominerais, sendo que argilominerais do tipo 2:1 expansivos, como a montmorilonita¹, apresentam mais reatividade e trazem maior

¹A montmorilonita é uma esmectita rica em Mg. É um argilomineral do tipo 2:1, expansivo, com substituições de Al^{3+} por Mg^{2+} nos octaedros. Sua capacidade de troca de cátions é de 50 a 160 $cmol_c kg^{-1}$ e uma área de superfície específica em torno de 800 $m^2 g^{-1}$, com grande capacidade de reter íons (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , etc.) e moléculas (herbicidas, compostos orgânicos, água) nas entrecamadas (REICHERT et al., 2010).

coesividade ao solo do que argilominerais do tipo 1:1 como a caulinita² (REICHERT et al., 2010).

Alguns estudos têm indicado que a umidade ótima para compactação encontra-se dentro da faixa de friabilidade do solo, ou seja, abaixo do limite de plasticidade do solo (SILVA et al., 2010), o que é verificado para todas as camadas dos solos avaliados, por meio dos valores da relação U_{OC}/LP (Tabela 6).

No SXe, os valores da relação U_{OC}/LP variaram de 0,31 a 0,83. No PVd, a variação foi de 0,56 a 0,65. No PVAd, de 0,57 a 0,68. No SXd, de 0,58 a 0,69. E no CXbd, de 0,73 a 0,80. Esses resultados não entram em concordância com Ojeniyi e Dexter (1979), os quais sugerem que a U_{OC} pode ser estimada como igual a 90 % do limite de plasticidade.

Braida (2004), para um Nitossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, encontrou um valor médio de 0,78 para esta relação, sendo esta influenciada pelo conteúdo de carbono orgânico do solo, apresentando tendência negativa, conforme aumentou o conteúdo de carbono. No presente trabalho, a relação U_{OC}/LP somente foi influenciada significativamente pelo conteúdo de argila do solo (Figura 36), sendo a correlação negativa ($r = -0,52$).

²A caulinita é um argilomineral do tipo 1:1, não expansivo. Na caulinita, as lâminas de Si e as de Al unem-se por meio dos oxigênios apicais do tetraedro, formando as camadas, as quais se reúnem entre si com muita rigidez, por meio de pontes de H, tornando a estrutura rígida e não expansível. A caulinita, nos solos, apresenta apenas a sua superfície externa em contato com a fase líquida, por não ser expansível (REICHERT et al., 2010).

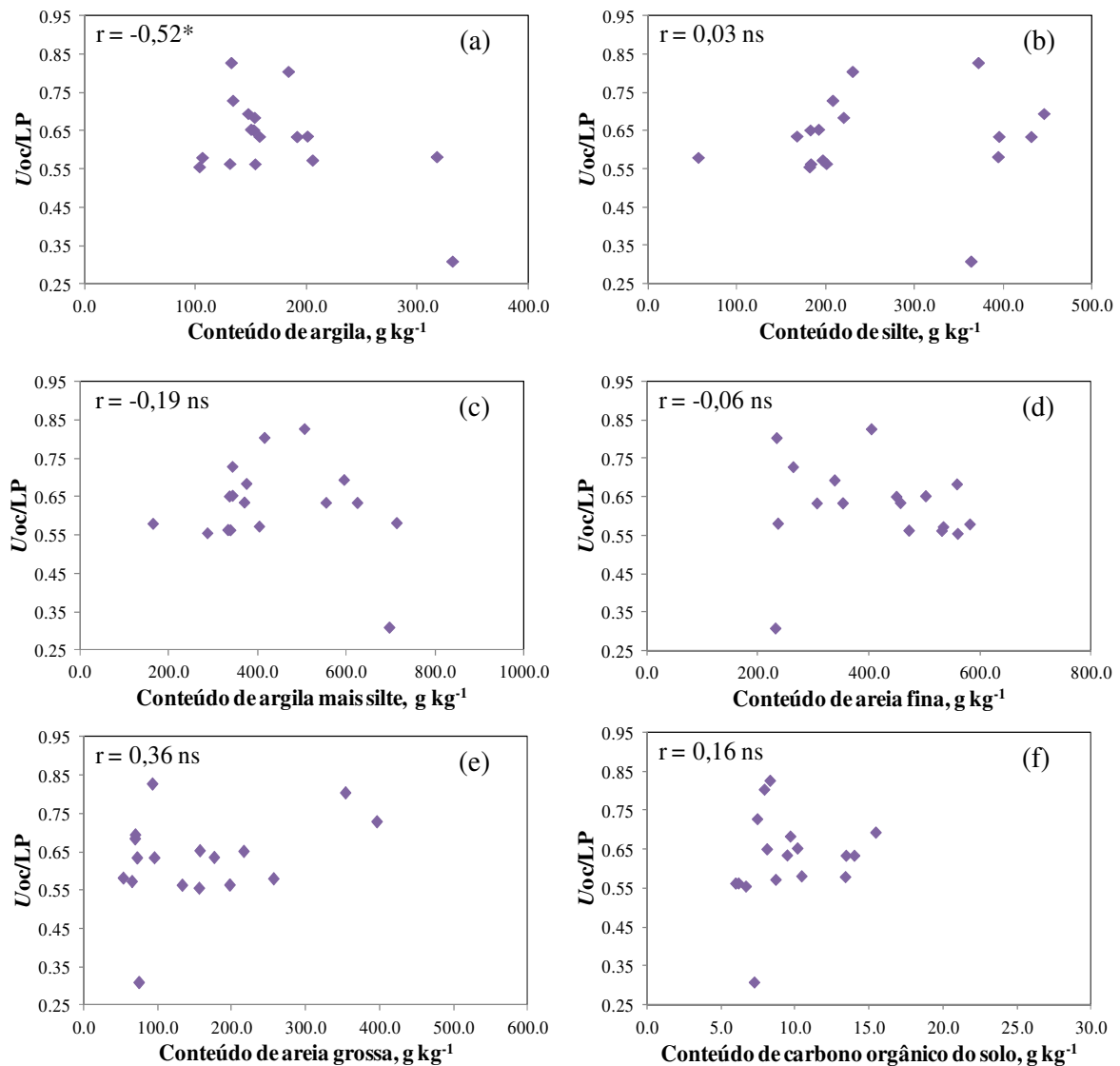


Figura 36 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a relação umidade ótima de compactação (U_{OC}) e limite de plasticidade (LP) com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f); *significativo a 5%; ns não significativo.

Tendo em vista as relações entre a $D_{S_{MAX}}$, U_{OC} , LL, LP e U_{OC}/LP com os atributos texturais e carbono orgânico do solo, procurou-se ajustar equações de regressão linear múltipla pelo procedimento *Stepwise* para essas variáveis (Tabela 7).

Para estimativa da $D_{S_{MAX}}$, somente o conteúdo de carbono orgânico entrou como variável explicativa, com R^2 de 0,81, Syx de $0,039\ Mg\ m^{-3}$ e valor F de 59,7. Para estimativa da U_{OC} , embora o conteúdo de silte isolado tenha apresentado melhor correlação (Figura 35b), no ajuste, após a eliminação de dados *outliers*, foi somente o conteúdo de argila mais silte somado que entrou como variável explicativa na equação, resultando num R^2 da equação de 0,68, Syx de $0,011\ kg\ kg^{-1}$ e valor F de 36,1. O LL foi a propriedade que teve a equação de

melhor ajuste, sendo estimado pelo conteúdo de argila mais silte, que explicou 70 % da variação do LL, junto ao conteúdo de carbono orgânico e conteúdo de argila, resultando num R^2 de 0,94, Syx de $0,015 \text{ kg kg}^{-1}$ e valor F de 238,5. O LP pode ser estimado a partir dos conteúdos de carbono orgânico, que explicou 77 % da variação, além da argila e areia grossa, resultando num R^2 de 0,82, Syx de $0,017 \text{ kg kg}^{-1}$ e valor F de 66,7. Por último, a relação U_{OC}/LP , como já visto pelas correlações, foi estimada pelo conteúdo de argila, sendo ajustada uma equação polinomial, assim como demonstrado por Silva et al. (2010), sendo o R^2 da equação de 0,84, Syx de 0,043 e valor F de 26,8.

Tabela 7 – Equações ajustadas para estimativa da densidade máxima ($D_{S_{MAX}}$), umidade ótima de compactação (U_{OC}), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e relação umidade ótima de compactação (U_{OC}) e limite de plasticidade (LP).

Variável Dependente	Variáveis Independentes				R^2	Syx	Valor F
$D_{S_{MAX}}$	Intercepto	C-org					
N = 16	2,02836	- 0,024891			0,81	0,0387	59,7**
U_{oc}	Intercepto	Argila+Silte					
N = 19	0,07504	0,000115			0,68	0,0114	36,1**
	Intercepto	Argila+Silte	C-org	Argila			
LL	0,05853	0,000388			0,70	0,0313	119,5**
		0,03871	0,000287	0,00561	0,90	0,0179	235,2**
N = 53	0,02285	0,000217	0,00624	0,00025	0,94	0,0148	238,5**
	Intercepto	C-org	Argila	Areia grossa			
LP	0,12570	0,00620			0,66	0,0226	88,7**
		0,08299	0,00026		0,76	0,0191	71,5**
N = 48	0,11247	0,00587	0,00022	- 0,00010	0,82	0,1681	66,7**
U_{oc}/LP	Intercepto	Argila ²	Argila				
	0,68788	- 0,000003			0,60	0,0650	16,2**
N = 13	0,23166	- 0,000013	0,00466		0,84	0,0425	26,8**

**significativo a 1%; R^2 : coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa; Argila: conteúdo de argila em g kg^{-1} ; Silte: conteúdo de silte em g kg^{-1} ; Areia grossa: conteúdo de areia grossa em g kg^{-1} ; C-org: conteúdo de carbono orgânico do solo em g kg^{-1} ; N: número de repetições.

3.3.3.2 Relação grau de compactação e densidade crítica do solo

O estabelecimento de valores de densidade crítica e de medidas para caracterizar o estado de compactação independentes do tipo de solo têm sido alvo de diversas pesquisas (REICHERT et al., 2009). Para solucionar este problema, trabalhos têm sido realizados na busca de um parâmetro que elimine, na medida do possível, as diferenças entre solos nas curvas de resposta de rendimento das culturas em função de valores ótimos. Uma solução para isto foi relacionar a densidade do solo em determinada condição de campo com uma densidade de referência, a qual foi denominada de grau de compactação (GC) (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000). Dessa forma, a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor vem sendo determinada, tendo como um dos seus principais objetivos a sua utilização como densidade de referência (CARTER, 1990; SILVA et al., 1994; SMITH et al., 1997a,b; TORRES; SARAIVA, 1999; KRZIC et al., 2004; BEUTLER et al., 2005; REICHERT et al., 2010).

Na área agrícola, diversos estudos têm avaliado a relação entre o rendimento de culturas e o grau de compactação do solo, sendo encontrados valores ótimos de rendimento de culturas com um GC na faixa de 80 a 90 % (CARTER, 1990; HÅKANSSON, 1990; LIPIEC et al., 1991; BEUTLER et al., 2005; SUZUKI, 2005).

Na área florestal, os trabalhos ainda são escassos, sendo que Zhao et al. (2010), analisando o crescimento em altura de mudas de coníferas (gêneros: *Pseudotsuga*, *Pinus* e *Picea*) no Canadá, relatam valores de crescimento ótimo com GC na faixa de 72 a 87 %, determinando que, em geral, valores de GC acima de 80 % podem ser restritivos ao crescimento de espécies florestais. No Brasil, Freire et al. (2011), compararam o crescimento de mudas do gênero *Eucalyptus* em condição de vaso, testando diferentes graus de compactação e adubação fosfatada. Os resultados mostraram que o crescimento ótimo foi em um GC de 85 %, sendo que o GC de 95 %, onde houve o menor crescimento de *Eucalyptus*, pode ser considerado restritivo.

Partindo desses pressupostos, procurou-se relacionar os valores de D_{scIHO} , com RP crítica a 2 e a 3 MPa, com os valores de D_{sMAX} obtidos pelo ensaio de Proctor (Figura 37).

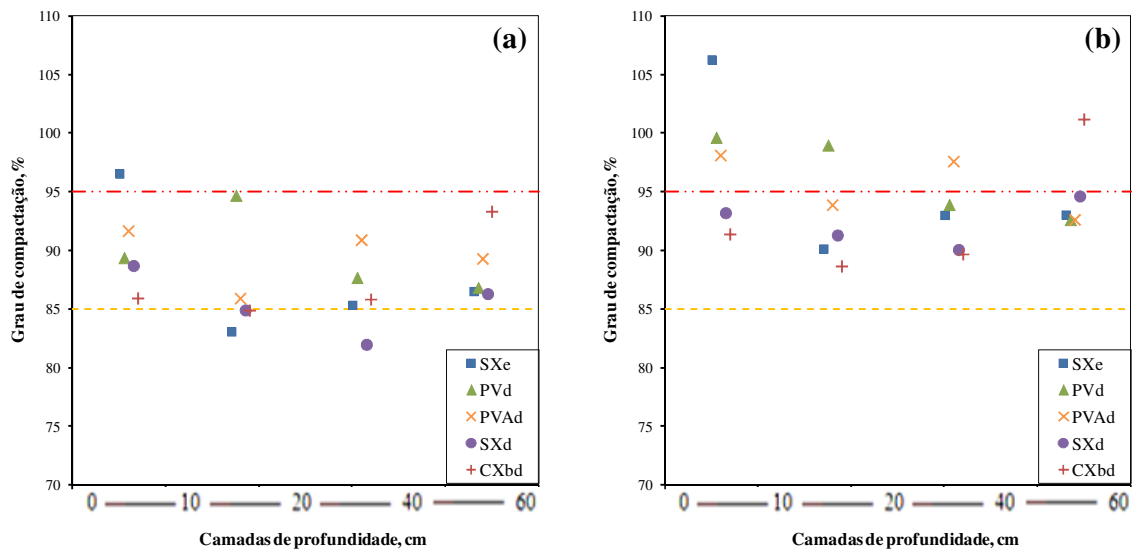


Figura 37 – Grau de compactação considerando a relação $D_{scIHO_{RP2MPa}}$ e $D_{S_{MAX}}$ (a), e $D_{scIHO_{RP3MPa}}$ e $D_{S_{MAX}}$ (b) para as quatro camadas dos solos avaliados; linhas tracejadas laranja e vermelha indicam grau de compactação a 85 e 95 %, respectivamente.

Com a D_{scIHO} calculada com RP crítica de 2 MPa (Figura 37a), pode-se ver que os valores de GC ficaram predominantemente entre 85 a 90 %, resultando num valor médio de 88 %. Com a $D_{scIHO_{RP3MPa}}$ (Figura 37b), o valores de GC aumentaram, estando na faixa de 90 a 100 %, e próximos a 94 %. Portanto, é possível inferir que valores de $D_{scIHO_{RP2MPa}}$ não sejam restritivos ao crescimento de espécies florestais, sendo mais aconselhável o uso de RP a 3 MPa para cálculo do IHO e obtenção da densidade crítica, assim como sugerem Whalley et al. (1995) e Zou et al. (2000).

A maior resistência à penetração de raízes de espécies florestais parte do pressuposto de que estas sejam mais “agressivas” do que raízes de culturas agrícolas, o que, em parte, é fato, principalmente no caso do sistema radicular de coníferas, as quais possuem raiz principal pivotante. Porém, Ribeiro et al. (2010), em experimento conduzido em condição de vaso com Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo de textura argilosa e média, respectivamente, detectaram que o aumento da densidade do solo reduziu o crescimento de soja e eucalipto, cujo efeito foi mais pronunciado no solo argiloso, sendo o eucalipto mais afetado do que a soja, e desse modo, demonstrando que, nem sempre, em todos os casos, as espécies florestais possuem sistema radicular mais agressivo do que culturas agrícolas, sobretudo, em relação ao crescimento inicial.

Tanto o GC calculado com $D_{scIHO_{RP2MPa}}$ como o $D_{scIHO_{RP3MPa}}$ não apresentaram relação significativa com as composições texturais e conteúdo de carbono orgânico do solo

(Figura 38), mostrando a independência desses índices em função da textura do solo, dentro das limitações estudadas e a importância e validade de se relacionar indicadores de qualidade física e trafegabilidade do solo.

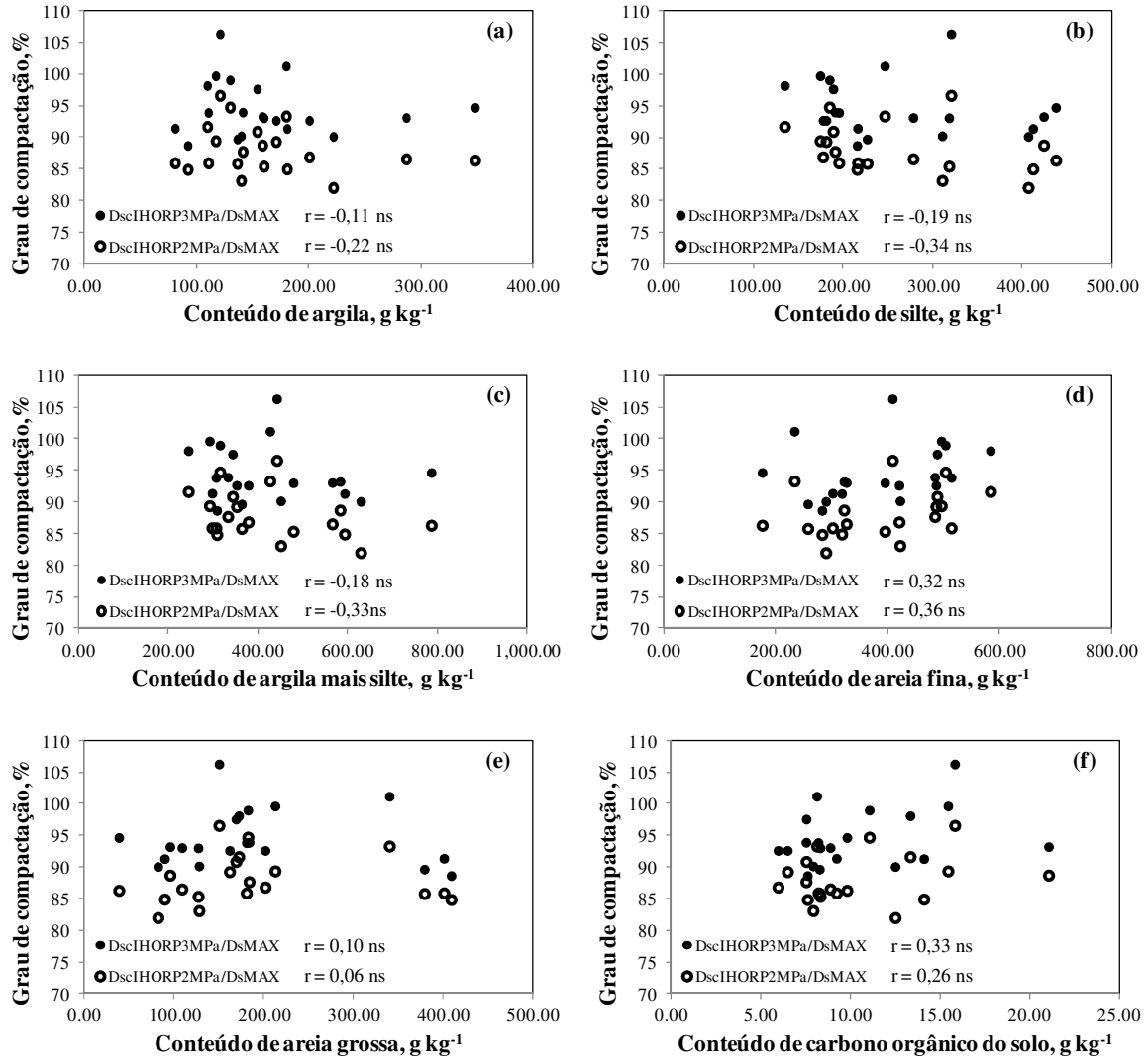


Figura 38 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o grau de compactação considerando a relação $D_{sc}IHO_{RP2MPa}$ e D_{sMAX} , e $D_{sc}IHO_{RP3MPa}$ e D_{sMAX} ; com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila mais silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f). ns não significativo.

3.3.3.3 Capacidade de suporte, susceptibilidade à compactação, compressibilidade do solo e pressões críticas para o crescimento de plantas

Os valores da estatística descritiva da densidade (D_s), umidade volumétrica (θ), composições texturais, conteúdo de carbono orgânico (C-org), pressão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressão do solo (IC) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estatística descritiva das propriedades, atributos e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão dos solos avaliados.

Variável	Média	Desvio padrão	CV%	Mínimo	Máximo
Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$)	1,50	0,14	9,11	0,76	1,82
Umidade volumétrica ($m^3\ m^{-3}$)	0,179	0,083	46,18	0,016	0,513
Conteúdo de argila ($g\ kg^{-1}$)	148,3	64,6	43,54	70,9	373,8
Conteúdo de silte ($g\ kg^{-1}$)	250,2	94,8	37,91	57,1	465,1
Conteúdo de areia fina ($g\ kg^{-1}$)	435,5	113,8	32,95	140,5	586,6
Conteúdo de areia grossa ($g\ kg^{-1}$)	256,0	136,6	53,36	30,2	484,5
Conteúdo de carbono orgânico do solo ($g\ kg^{-1}$)	9,68	4,27	44,09	4,1	26,8
Pressão de pré-consolidação (kPa)	152,8	84,7	55,44	4,0	601,5
Índice de compressão	0,210	0,096	45,81	0,009	0,765

CV: coeficiente de variação.

Observa-se uma ampla variação das propriedades, atributos e parâmetros físicos estudados, uma vez que isso foi esperado, em virtude de serem avaliados diferentes solos, com distinção de textura e situações de campo (antes e após preparo, antes e após tráfego de máquinas).

Em busca de uma análise mais detalhada, na Tabela 9, são apresentadas as estatísticas descritivas dos valores de D_s , θ , σ_p e IC para as quatro camadas dos cinco solos avaliados.

O SXd apresentou os menores valores de D_s e maiores de θ , o que ocorreu devido a sua textura ser composta por maiores conteúdos de argila, silte e carbono orgânico do que os outros solos, e, assim, como discutido anteriormente, resultando em menor densidade de partículas do solo e maior retenção de água. Em viés, o CXbd apresentou os maiores valores de D_s e menores de θ , associando isso à sua composição textural, mas também, devido a este solo ter sido submetido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira com peso total de até 25,4 Mg.

Tabela 9 – Estatística descritiva para as propriedades e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	Variável																			
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)					Umidade volumétrica (m ³ m ⁻³)					Pressão de pré-consolidação (kPa)					Índice de compressão				
	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max
Planossolo Háplico Eutrófico (SXE)																				
0 – 10	1,42	0,13	9,21	1,20	1,69	0,243	0,091	37,44	0,109	0,454	101,2	49,6	49,07	42,6	203,7	0,213	0,070	33,04	0,091	0,345
10 – 20	1,47	0,08	5,74	1,32	1,63	0,235	0,085	36,30	0,118	0,400	162,9	67,5	41,46	77,9	373,4	0,242	0,064	26,57	0,116	0,445
20 – 40	1,47	0,10	6,76	1,10	1,72	0,207	0,077	37,15	0,103	0,406	171,7	93,4	54,12	33,9	420,1	0,271	0,051	19,00	0,131	0,384
40 – 60	1,48	0,08	5,73	1,30	1,70	0,234	0,096	41,10	0,092	0,427	116,3	53,6	46,06	4,0	254,8	0,243	0,070	28,86	0,147	0,402
Argissolo Vermelho Distrófico (PVd)																				
0 – 10	1,40	0,12	8,33	1,04	1,55	0,181	0,060	33,35	0,082	0,320	132,9	80,6	60,66	31,5	405,9	0,223	0,051	22,65	0,163	0,377
10 – 20	1,54	0,08	5,02	1,26	1,65	0,163	0,057	35,00	0,090	0,314	208,3	91,5	43,91	70,0	469,1	0,197	0,050	25,62	0,144	0,416
20 – 40	1,54	0,06	3,74	1,37	1,64	0,143	0,049	34,42	0,054	0,216	226,2	115,6	51,11	61,3	480,2	0,208	0,051	24,47	0,077	0,308
40 – 60	1,59	0,06	3,56	1,49	1,72	0,172	0,054	31,43	0,099	0,310	164,3	80,4	48,92	53,6	360,9	0,215	0,028	13,15	0,168	0,272
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)																				
0 – 10	1,39	0,11	7,90	1,03	1,55	0,165	0,063	37,98	0,068	0,286	111,9	52,4	46,80	34,0	215,6	0,242	0,063	26,19	0,148	0,464
10 – 20	1,48	0,07	4,53	1,31	1,58	0,156	0,052	33,37	0,066	0,256	169,9	70,5	41,52	45,5	326,3	0,209	0,042	19,89	0,141	0,296
20 – 40	1,54	0,06	4,09	1,40	1,67	0,144	0,048	33,00	0,082	0,245	194,9	101,0	51,79	62,8	402,5	0,207	0,052	25,12	0,137	0,345
40 – 60	1,54	0,07	4,72	1,37	1,69	0,168	0,067	33,73	0,084	0,314	167,7	91,6	54,59	61,6	487,6	0,194	0,040	20,74	0,129	0,296
Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd)																				
0 – 10	1,16	0,18	15,36	0,76	1,56	0,288	0,076	26,39	0,154	0,435	93,7	47,6	50,79	18,9	195,5	0,416	0,132	31,74	0,221	0,765
10 – 20	1,33	0,08	6,13	1,08	1,47	0,239	0,054	22,40	0,156	0,339	170,2	75,1	44,12	28,7	335,8	0,343	0,066	19,34	0,224	0,521
20 – 40	1,32	0,09	6,97	1,19	1,48	0,245	0,060	24,52	0,129	0,346	168,6	82,5	48,94	53,9	373,1	0,364	0,070	19,33	0,233	0,522
40 – 60	1,28	0,12	9,39	1,07	1,64	0,368	0,092	24,84	0,189	0,513	103,97	50,1	48,15	26,9	189,4	0,320	0,085	26,58	0,156	0,496
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)																				
0 – 10	1,58	0,09	5,37	1,21	1,82	0,132	0,058	43,97	0,032	0,276	149,5	79,5	53,20	28,6	601,5	0,115	0,046	40,46	0,009	0,305
10 – 20	1,58	0,07	4,47	1,41	1,79	0,143	0,056	39,05	0,016	0,267	143,3	91,7	63,99	21,2	554,1	0,123	0,049	40,20	0,020	0,279
20 – 40	1,54	0,07	4,59	1,27	1,78	0,149	0,047	31,76	0,051	0,322	169,2	84,7	50,08	39,5	410,9	0,179	0,067	37,64	0,027	0,330
40 – 60	1,55	0,07	4,21	1,39	1,76	0,154	0,060	38,68	0,048	0,353	144,6	76,8	53,09	40,1	538,7	0,216	0,064	29,50	0,020	0,349

Desvio: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Min: valor mínimo; Max: valor máximo.

A σ_p média foi maior no PVd, contudo, foi o CXbd que apresentou os valores extremos de mínimo e máximo, o que aconteceu devido ao tráfego de máquinas sobre este solo. O IC foi maior no SXd e menor no CXbd, sugerindo maior susceptibilidade do primeiro e menor do segundo.

3.3.3.3.1 Relação entre capacidade de suporte, atributos físicos e estados de compactação do solo

A capacidade de suporte do solo, expressa pela σ_p , apresentou relação positiva e significativa com a D_s ($r = 0,20$), ou seja, quanto maior a D_s , maior a capacidade de suporte de carga do solo (Figura 39a). Resultados semelhantes foram encontrados por Imhoff (2002), Silva et al. (2002b), Debiasi et al. (2008), Suzuki (2008) e Goulart (2012). Silva e Cabeda (2006) relatam que um maior estado de compactação ocasiona um empacotamento mais denso das partículas do solo devido à sua compressão e, assim, havendo um maior número de pontos de contato entre as partículas, promovendo, dessa forma, maior capacidade de suporte.

Com a umidade do solo, a σ_p apresentou a maior correlação significativa analisada ($r = -0,38$), sendo esta relação negativa (Figura 39b). O fato também foi observado em outras pesquisas (IMHOFF, 2002; BRAIDA, 2004; SILVA; CABEDA, 2006; SILVA et al., 2006b; SUZUKI, 2008; MENTGES, 2010; GOULART, 2012). Em geral, o solo em condições de baixa umidade se torna mais resistente às deformações impostas por pressões externas, em função da alta fricção entre suas partículas. Porém, com o aumento da umidade, as partículas do solo têm sua coesão e atrito reduzidos, pois a água age como um lubrificante e favorece o rearranjo das partículas e, por consequência, reduz a capacidade do solo em suportar cargas (HILLEL, 1998; DIAS JÚNIOR, 1994; IMHOFF, 2002; REICHERT et al., 2007). Devido a isso é que a condição de umidade do solo constitui-se em um fator determinante na capacidade do solo em resistir à compactação pelo tráfego de máquinas (SILVA et al., 2002b), e, no caso da colheita da madeira, apresenta-se como uma variável importante para o planejamento das operações, uma vez que o agendamento do tráfego, conforme as condições de umidade do solo, pode contribuir para aumentar a trafegabilidade do solo, minimizando a compactação, e, conseqüentemente, as perdas de produtividade (DIAS JÚNIOR et al., 2005).

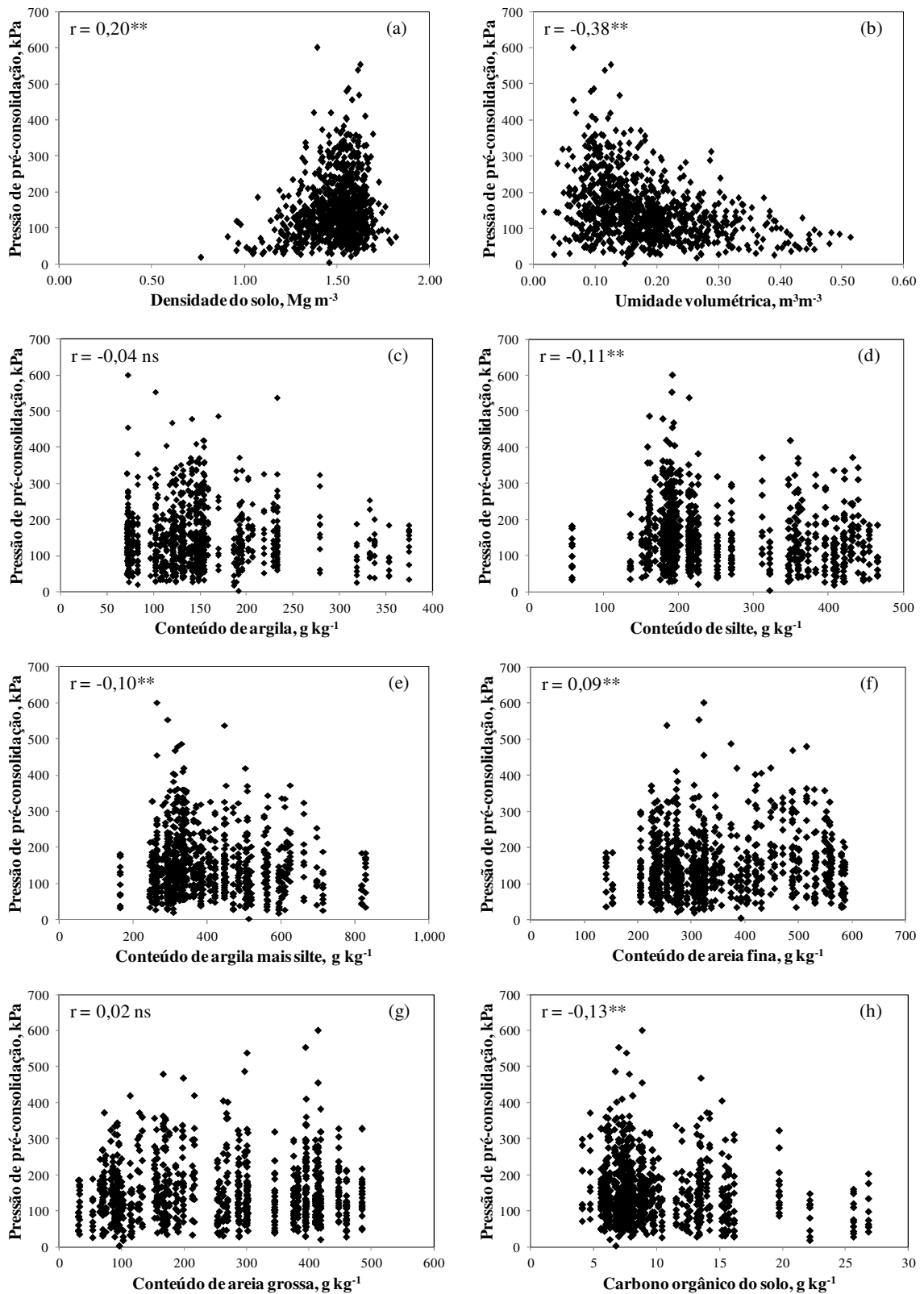


Figura 39 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a pressão de pré-consolidação com a densidade do solo (a), umidade volumétrica (b), conteúdos de argila (c), silte (d), argila mais silte (e), areia fina (f), areia grossa (g) e carbono orgânico do solo (h). ******significativo a 1%; ns não significativo.

A relação com o conteúdo de argila não foi significativa (Figura 39c), entrando em discordância com os resultados de Suzuki (2008) e Imhoff (2002). De acordo com Horn e Lebert (1991), a tendência é que a uma mesma densidade e a uma mesma tensão de água, o solo seja mais compressivo quanto maior for o conteúdo de argila. Embora isto não tenha sido constatado, pode-se aplicar em função da relação significativa e negativa com o conteúdo de silte ($r = -0,11$) e com argila mais silte ($r = -0,10$), sendo positiva e significativa com o conteúdo de areia fina ($r = 0,09$), o que também entra em concordância com Smith et al. (1997a), que também observaram que solos arenosos são menos compressivos que solos argilosos.

Com o conteúdo de carbono orgânico, a relação foi significativa e negativa ($r = -0,13$) (Figura 39h), em semelhança ao relatado por Braida (2004), o qual cita que a matéria orgânica pode exercer dois efeitos contrários sobre a resistência do solo à compactação: um relacionado com o aumento da coesão entre as partículas minerais e outro com a mudança no arranjo das mesmas com a redução da densidade, sendo que, no primeiro, a capacidade de suporte de carga do solo aumenta e, no segundo, diminui.

Tendo em vista a relação da σ_p com D_s e θ , foram ajustadas equações de regressão não-linear para estimativa da capacidade de suporte para as camadas avaliadas de cada solo, por meio do modelo de Busscher (1990) (Tabela 10), da mesma forma que Severiano et al. (2010) e Goulart (2012) propõem.

Dentre as equações ajustadas para as camadas avaliadas no SXe, os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm de profundidade, com R^2 de 0,87 para primeira e R^2 de 0,89 para a segunda camada, sendo o S_{yx} menor (16,72 kPa) e o valor F maior (378,76) para esta camada. No PVd, o melhor ajuste ocorreu na camada de 0 a 10 cm, com R^2 de 0,81, S_{yx} de 24,02 kPa e valor F de 236,09. Para o PVAd, as camadas de 0 a 10 e 40 a 60 cm tiveram os maiores valores de R^2 , com 0,78 para a primeira e 0,85 para a segunda camada, porém, a primeira apresentou menor S_{xy} (26,27 kPa) e a segunda maior valor F (241,70). Já para o SXd, o melhor ajuste para estimativa da σ_p ocorreu na camada de 10 a 20 cm. Enquanto no CXbd, as camadas de 0 a 10, 20 a 40 e 40 a 60 cm apresentaram os maiores R^2 (0,71, 0,78 e 0,71 respectivamente), porém, o ajuste na primeira camada teve um S_{yx} menor (26,93 kPa); na segunda, o valor F foi maior (668,09) e, na última, o S_{yx} (42,34 kPa) foi maior do que nas outras camadas. Em todos os solos e em todas as camadas avaliadas, as equações ajustadas para estimativa da σ_p foram significativas a 1 %, sendo eliminados dados *outliers*.

Tabela 10 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação (σ_p) em função da umidade volumétrica (θ) e da densidade (D_s) para as quatro camadas dos solos avaliados.

Camada (cm)	Equação ajustada	R ²	Syx	Valor F	N
Planossolo Háplico Eutrófico (SXe)					
0 – 10	$\sigma_p = 5,24370 \theta^{-0,7606} D_s^{4,4130}$	0,87	19,23	184,48**	20
10 – 20	$\sigma_p = 27,2111 \theta^{-0,5370} D_s^{2,7246}$	0,75	34,59	228,50**	25
20 – 40	$\sigma_p = 15,6564 \theta^{-0,7430} D_s^{2,2505}$	0,89	16,72	378,76**	20
40 – 60	$\sigma_p = 9,05194 \theta^{-0,8644} D_s^{3,2627}$	0,71	23,49	196,15**	23
Argissolo Vermelho Distrófico (PVd)					
0 – 10	$\sigma_p = 9,46158 \theta^{-0,7822} D_s^{3,5123}$	0,81	24,02	236,09**	24
10 – 20	$\sigma_p = 12,9886 \theta^{-0,8921} D_s^{2,3804}$	0,76	34,64	256,11**	25
20 – 40	$\sigma_p = 8,94150 \theta^{-1,1165} D_s^{2,1319}$	0,79	52,47	166,87**	26
40 – 60	$\sigma_p = 15,0672 \theta^{-1,0748} D_s^{0,9843}$	0,71	44,87	170,38**	26
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd)					
0 – 10	$\sigma_p = 9,53153 \theta^{-0,5252} D_s^{4,4757}$	0,78	26,27	233,99**	24
10 – 20	$\sigma_p = 12,3597 \theta^{-0,5311} D_s^{3,8697}$	0,70	32,54	212,47**	24
20 – 40	$\sigma_p = 14,8685 \theta^{-0,8355} D_s^{2,0353}$	0,69	52,71	160,22**	22
40 – 60	$\sigma_p = 12,6830 \theta^{-0,9106} D_s^{1,8629}$	0,85	28,10	241,70**	24
Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd)					
0 – 10	$\sigma_p = 15,6695 \theta^{-1,0832} D_s^{1,7173}$	0,84	21,20	86,23**	26
10 – 20	$\sigma_p = 8,56988 \theta^{-1,1644} D_s^{4,2120}$	0,89	25,40	379,14**	23
20 – 40	$\sigma_p = 9,87317 \theta^{-1,3734} D_s^{2,7352}$	0,71	46,56	148,89**	30
40 – 60	$\sigma_p = 27,9074 \theta^{-0,8688} D_s^{1,5960}$	0,78	21,94	170,34**	21
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)					
0 – 10	$\sigma_p = 12,9298 \theta^{-0,4263} D_s^{3,2724}$	0,71	26,93	624,55**	66
10 – 20	$\sigma_p = 16,1309 \theta^{-0,7263} D_s^{1,4174}$	0,65	40,72	383,96**	73
20 – 40	$\sigma_p = 16,7145 \theta^{-0,9309} D_s^{1,6489}$	0,78	41,21	668,09**	44
40 – 60	$\sigma_p = 11,5872 \theta^{-0,9141} D_s^{1,7360}$	0,71	42,34	501,89**	49

**significativo a 1 %; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em kPa; σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa); θ : umidade volumétrica (m³ m⁻³); D_s: densidade do solo (Mg m⁻³); N: número de repetições.

Após o ajuste das equações, em semelhança ao que foi feito para os indicadores de qualidade física, procurou-se analisar o efeito de diferentes valores de D_s, mas, desta vez,

sobre a capacidade de suporte para as quatro camadas dos cinco solos analisados. A umidade volumétrica ótima de compactação (θ_{OC}) foi calculada multiplicando o valor desta em base gravimétrica (U_{OC}) pelo valor de densidade máxima do solo (D_{sMAX}), sendo o mesmo realizado para as umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{CC}), nos limites de liquidez (θ_{LL}) e de plasticidade (θ_{LP}).

O efeito de diferentes valores de D_s sobre a capacidade de suporte do SXe foi mais evidente nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm (Figura 40).

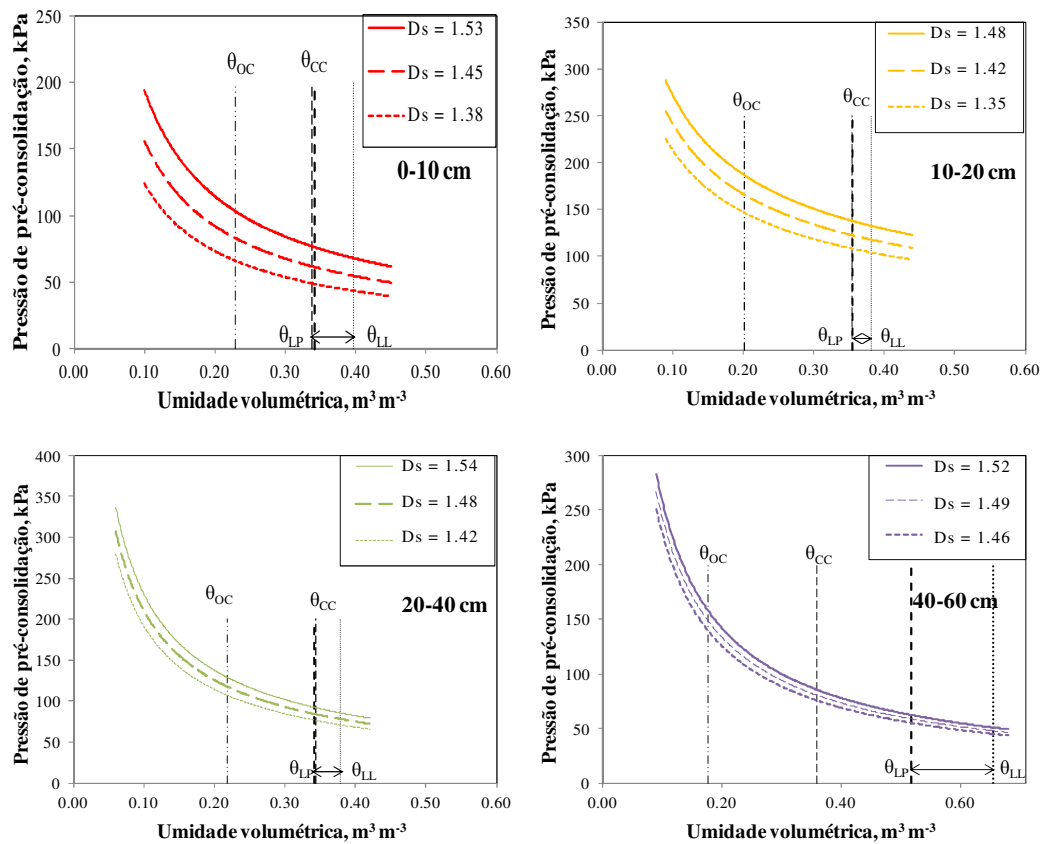


Figura 40 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.

Pode-se ver que, na primeira camada (0 a 10 cm), o valor de σ_p na umidade correspondente à ótima de compactação (θ_{OC}) foi de 103, 83 e 66 kPa, para as condições de alta, média e baixa D_s , respectivamente. Ou seja, de uma condição de D_s baixa para D_s alta, houve um aumento em torno de 50 % da σ_p . A camada de 10 a 20 cm, em média, apresentou os maiores valores de σ_p , de 187, 167 e 147 kPa, para as condições de alta, média e baixa D_s , respectivamente, na θ_{OC} , sendo o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta na ordem de 30 %.

Na camada de 20 a 40 cm de profundidade, os valores chegaram a ser maiores que na primeira camada, sendo inferiores em relação à segunda. Entretanto, conforme a umidade do solo diminuiu, a σ_p incrementou de forma acentuada, resultando em valores maiores do que a camada anterior. Nessa camada, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta foi mais discreto, sendo na ordem de 20 %. A camada mais profunda apresentou um comportamento semelhante ao da camada anterior, uma vez que o secamento do solo aumentou exponencialmente a σ_p . Além disso, pode-se ver que as umidades correspondentes à ótima de compactação, capacidade de campo e limites de consistência ficaram “distantes”, sendo que, da θ_{LP} para a θ_{CC} , houve somente um aumento médio de 59 para 80 kPa, enquanto que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento foi de 80 para 150 kPa, ou seja, cerca de 90 %, deixando evidente a importância da condição de umidade do solo na sua capacidade de suporte.

No PVD, a capacidade de suporte se apresentou mais influenciada pela umidade do que no solo anterior. Além disso, as diferentes densidades não resultaram em grandes distinções na capacidade de suporte (Figura 41).

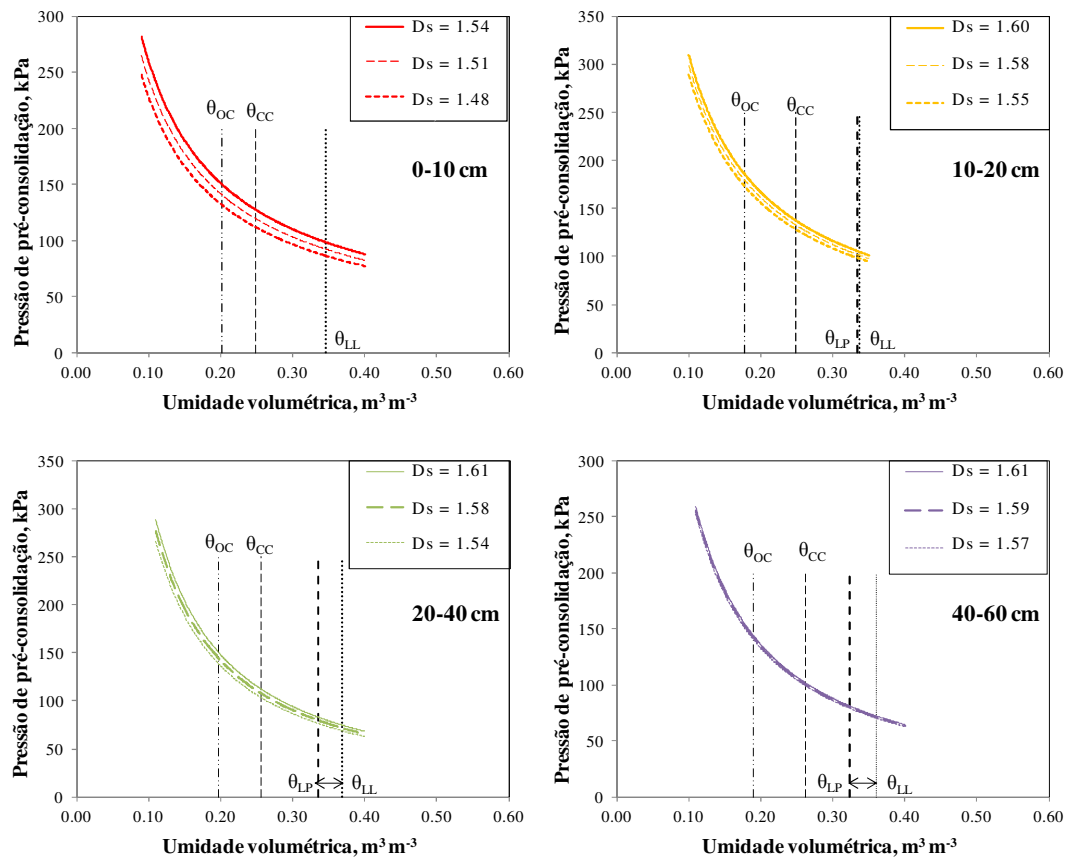


Figura 41 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVD); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.

Na camada de 0 a 10 cm, o valor de σ_p para as condições de D_s alta, média e baixa, foi de 150, 140 e 132 kPa, respectivamente, ou seja, de uma condição de D_s baixa para D_s alta, houve um aumento em torno de 15 % da σ_p . A camada de 10 a 20 cm, em média, também apresentou os maiores valores de σ_p , de 186, 179 e 173 kPa, para as condições de alta, média e baixa D_s , respectivamente, na θ_{OC} , sendo o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta na ordem de 10 %. Contudo, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio foi de 133 para 179 kPa, isto é, em torno de 35 %. Na camada de 20 a 40 cm, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta também foi na ordem de 10 %, sendo que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio, outra vez, ficou em torno de 35 %. Na camada de 40 a 60 cm, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta foi expressivamente menor, na ordem de 3 %, enquanto que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio foi em torno de 40 %.

No PVAd, o comportamento da capacidade de suporte foi semelhante ao SXd, sendo influenciada, sobretudo, nas camadas superficiais (Figura 42).

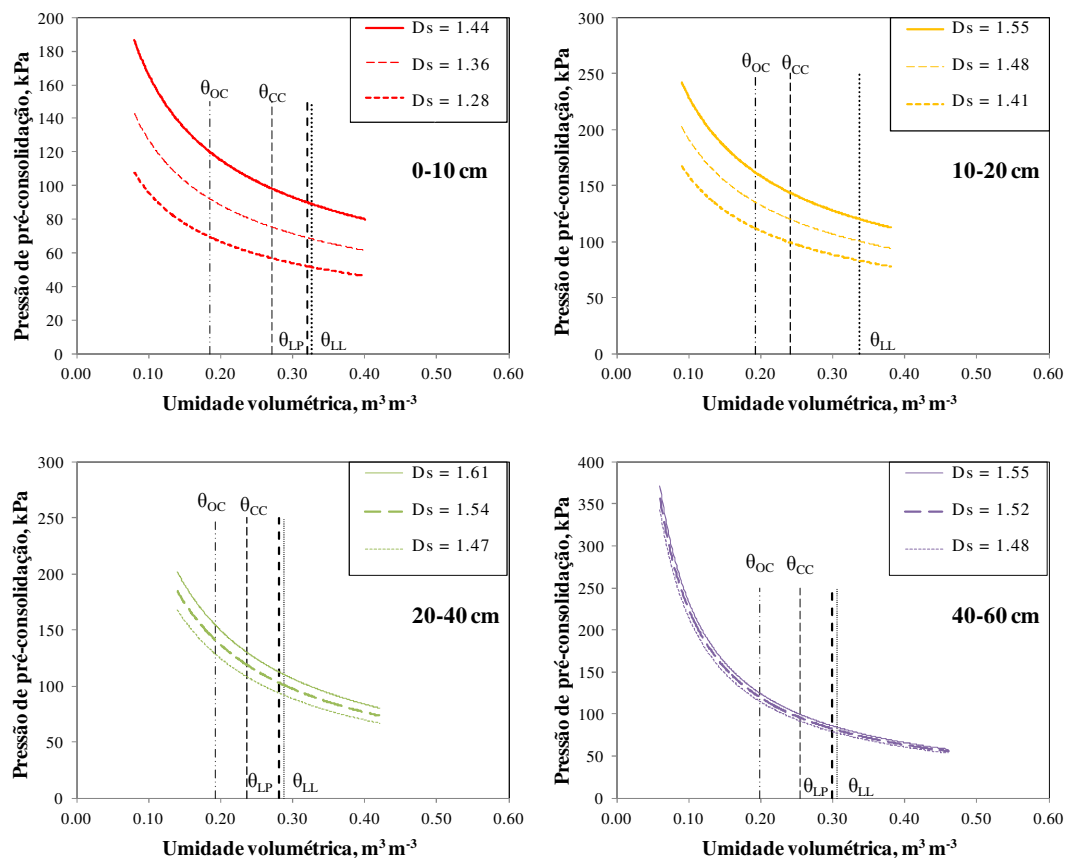


Figura 42 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.

Na camada de 0 a 10 cm, o valor de σ_p para as condições de D_s alta, média e baixa, foi de 129, 104 e 84 kPa, respectivamente, ou seja, de uma condição de D_s baixa para D_s alta, houve um aumento em torno de 50 % da σ_p e, como a θ_{OC} equivaleu a 70 % da θ_{CC} , o aumento médio da σ_p , de uma condição para outra, foi em torno de 35 %. A camada de 10 a 20 cm, outra vez, em média, apresentou os maiores valores de σ_p , de 162, 135 e 112 kPa, para as condições de alta, média e baixa D_s , respectivamente, na θ_{OC} , sendo o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta, na ordem de 45 %, enquanto, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio foi de 121 para 136 kPa, isto é, em torno de 15 %, uma vez que a θ_{OC} equivaleu a 80 % da θ_{CC} . Na camada de 20 a 40 cm, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta foi menor, sendo na ordem de 20 %, enquanto que da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio também ficou em torno de 20 %. Na camada de 40 a 60 cm, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta, foi mais discreto, na ordem de 9 %, enquanto que da θ_{CC} para θ_{OC} o aumento médio foi em torno de 25 %.

No SXd, as diferentes densidades também afetaram a capacidade de suporte do solo (Figura 43).

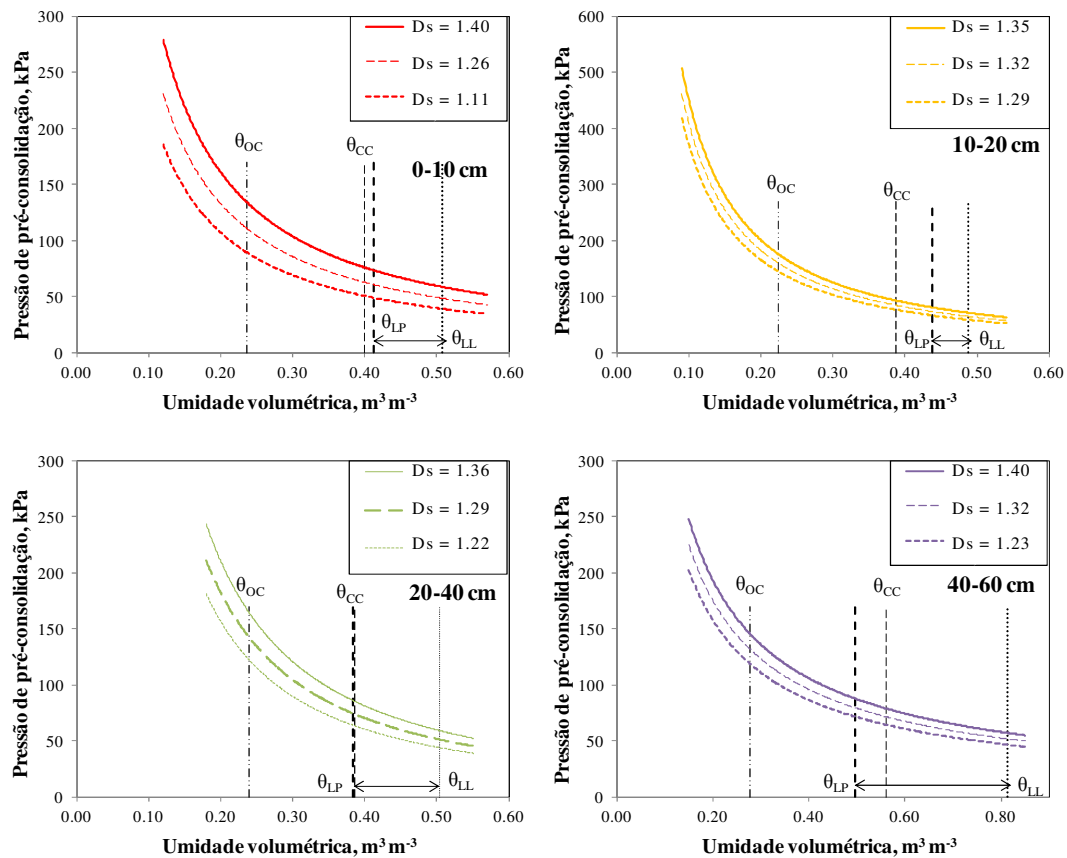


Figura 43 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.

Na camada de 0 a 10 cm, o valor de σ_p em alta, média e baixa D_s , foi de 134, 111 e 89 kPa, respectivamente. Ou seja, da condição de baixa para alta D_s , houve um aumento em torno de 50 % da σ_p e, como a θ_{OC} equivaleu a 60 % da θ_{CC} , o aumento médio da σ_p de uma condição para outra foi expressivo, em torno de 80 %. A camada de 10 a 20 cm, mais uma vez, em média, apresentou os maiores valores de σ_p na θ_{OC} , 175, 159 e 144 kPa para alta, média e baixa D_s , respectivamente. O aumento da σ_p de baixa para alta D_s foi na ordem de 20 %, enquanto que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio foi de 84 para 160 kPa, isto é, cerca de 90 %. Na camada de 20 a 40 cm, o aumento da σ_p da D_s baixa para D_s alta foi na ordem de 35 %, enquanto que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio também ficou em torno de 90 %, uma vez que, da mesma forma que na camada anterior, a θ_{OC} equivaleu a 60 % da θ_{CC} . Na camada de 40 a 60 cm, o aumento da σ_p de baixa para alta D_s foi mais discreto, na ordem de 25 %, ao passo que, da θ_{CC} para θ_{OC} , o aumento médio foi em torno de 80 %.

Finalmente no CXbd, a capacidade de suporte se apresentou mais influenciada pela umidade do que pelas diferentes densidades, exceto na camada de 0 a 10 cm (Figura 44).

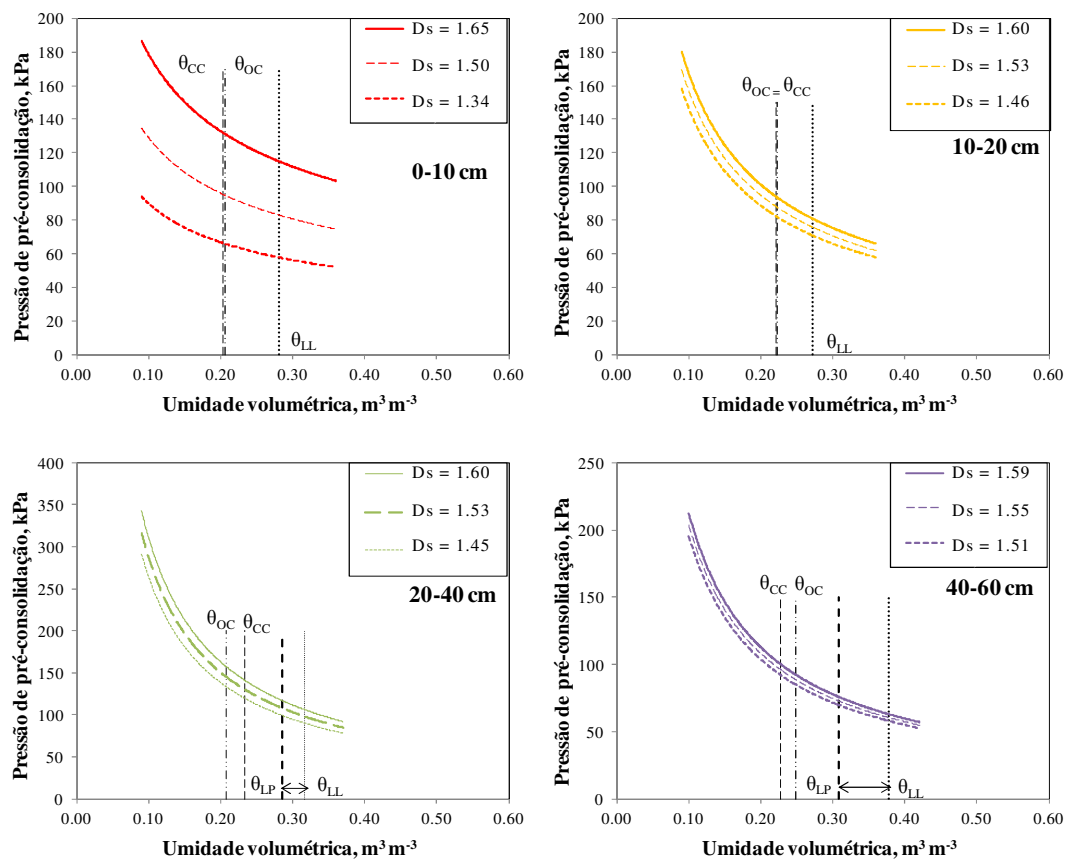


Figura 44 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{LP} : umidade no limite de plasticidade; θ_{LL} : umidade no limite de liquidez.

Nessa camada (0 a 10 cm), o valor de σ_p para as condições de Ds alta, média e baixa, foi de 131, 95 e 66 kPa, respectivamente. Em outras palavras, da condição de Ds baixa para Ds alta, a capacidade de suporte praticamente aumentou 100 %. Além disso, a θ_{OC} equivaliu ao mesmo valor da θ_{CC} , assim, comparou-se o aumento médio da σ_p da θ_{LL} para θ_{CC} , sendo cerca de 15 %. A camada de 10 a 20 cm, em viés ao observado nos outros solos, em média, apresentou os menores valores de σ_p , de 94, 88 e 82 kPa, para as condições de alta, média e baixa Ds, respectivamente, na θ_{OC} ou θ_{CC} que se equivaleram, sendo o aumento da σ_p da Ds baixa para Ds alta na ordem de 15 %, enquanto o aumento médio da θ_{LL} para θ_{CC} foi de 76 para 88 kPa, ou seja, cerca de 25 % novamente. Na camada de 20 a 40 cm, o aumento da σ_p da Ds baixa para Ds alta foi na ordem de 20 %, sendo que a θ_{OC} equivaliu a 90 % da θ_{CC} . Na camada de 40 a 60 cm, o aumento da σ_p da Ds baixa para Ds alta, foi menor, na ordem de 10 %, além disso, pode-se ver que θ_{OC} se encontrou numa condição maior do que a θ_{CC} . Nessa camada, o aumento médio da σ_p da θ_{LL} para θ_{CC} foi de cerca de 60 %.

Em termos práticos, visando a mitigar a compactação, seria recomendável que as operações mecanizadas de colheita da madeira fossem sempre realizadas quando os solos se encontrassem em condições de umidade baixa, uma vez que as máquinas florestais modernas podem aplicar pressões sobre o solo em torno de 400 kPa (HORN et al., 2004). Contudo, como as operações de colheita ocorrem durante todas as estações do ano e não em determinados períodos como na área agrícola, justifica-se, daí, a importância do entendimento da capacidade dos solos em relação ao tráfego de máquinas. Então, como não se pode “controlar” as condições de umidade do solo, o mais importante é determinar os níveis aceitáveis de impacto para cada condição e gerenciá-las (FROEHLICH, 1977).

Tendo em vista a ampla variação de valores de σ_p obtidos, os quais foram influenciados significativamente pela textura dos solos, além da Ds e θ , procurou-se ajustar equações de regressão linear múltipla por *Stepwise* para estimativa da capacidade de suporte (Tabela 11).

A primeira equação ajustada para estimativa da σ_p foi baseada numa relação linear entre a σ_p e as variáveis independentes explicativas Ds, θ e composições texturais, de maneira semelhante ao que propõe Imhoff (2002). Nesta equação, a maior parte da variação da σ_p foi explicada por θ (41 %). O acréscimo das variáveis conteúdos de areia grossa, argila mais silte e Ds, contribuiu em 16 % na predictabilidade da σ_p e, assim, resultou num coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj.) de 0,569, Syx de 43,87 kPa e valor F de 178,4 (Tabela 11).

Tabela 11 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação.

Variável Dependente	Variáveis Independentes					R ²	Syx	Valor F	
	Intercepto	θ	Argila+Silte	Ds	Areia grossa				
σ_p	248,776	- 506,710				0,41	51,57	368,0**	
	213,588	- 682,359	0,17195			0,49	47,94	255,1**	
	- 14,4434	- 597,643	0,20829	132,7578		0,53	46,01	200,0**	
	- 13,6902	- 601,565	0,14110	173,3540	- 0,13908	0,57	43,87	178,4**	
N = 532						R ² aj. = 0,569			
	Intercepto	Ln(θ)	Ln(Argila+Silte)	Ln(Ds)	Ln(Areia grossa)	C-org			
Ln(σ_p)	3,63804	- 0,73318					0,48	49,29	491,7**
	0,75214	- 0,90381	0,43585				0,55	45,03	322,7**
	- 0,52347	- 0,74572	0,57916	1,79166			0,64	43,84	312,2**
	1,93562	- 0,77180	0,32018	2,19462	- 0,21362		0,68	41,83	284,9**
	1,59372	- 0,78096	0,31125	2,41808	- 0,21318	0,13223	0,69	41,15	236,3**
N = 532						R ² aj. = 0,685			

**significativo a 1%; R²: coeficiente de determinação; R² aj.: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro-padrão da estimativa em kPa; Ln: logaritmo natural; θ : umidade volumétrica em m³ m⁻³; Ds: densidade do solo em Mg m⁻³; Argila: conteúdo de argila em g kg⁻¹; Silte: conteúdo de silte em g kg⁻¹; Areia grossa: conteúdo de areia grossa em g kg⁻¹; C-org: conteúdo de carbono orgânico do solo em g kg⁻¹.

Embora o ajuste da equação regressão múltipla tenha sido razoável (R² aj. = 0,569), pode-se verificar, anteriormente, que a Ds e θ se relacionaram com a σ_p de forma não-linear (Tabela 10), o que também pode ser válido para as composições texturais. Então, em vista de contornar esse problema, novamente, foi ajustado um modelo de regressão, mas, desta vez, utilizando as variáveis de forma logaritmizadas. Nessa forma, a variação de σ_p também foi explicada pelos conteúdos de areia grossa, argila mais silte, Ds e θ , porém, houve o acréscimo da variável independente conteúdo de carbono orgânico (C-org) como explicativa, resultando num R² ajustado superior à equação anterior (0,685), Syx menor (41,15 kPa) e valor F maior (227,9), salientando que todas as estatísticas de ajuste foram recalculadas para a unidade da variável de interesse, no caso, σ_p em kPa, sendo eliminados dados considerados como discrepantes (*outliers*).

Por meio da distribuição de resíduos (Figura 45), pode-se ver que essa última equação apresentou maior tendência de superestimativa dos valores mais baixos de σ_p , enquanto que

para valores maiores de σ_p , houve a tendência de subestimação, o que resulta em cautela na sua utilização, embora fisicamente a equação tenha coerência.

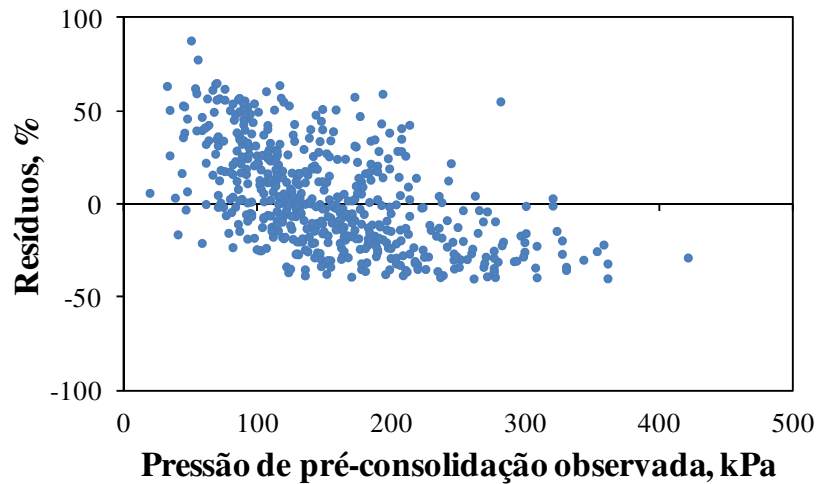


Figura 45 – Distribuição percentual dos resíduos em relação aos valores observados de pressão de pré-consolidação da equação usando variáveis logaritmizadas.

De um modo geral, as equações ajustadas 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; 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 melhor compreensão dos atributos que influenciam a compactação do solo.

3.3.3.3.2 Relação entre susceptibilidade e atributos físicos do solo

A susceptibilidade do solo à compactação, expressa pelo índice de compressão (IC), apresentou relação negativa e significativa com a D_s ($r = -0,79$), demonstrando que quanto menor for a D_s , maior será sua susceptibilidade, sendo a relação a mais forte em comparação às outras (Figura 46a). Tendência semelhante foi encontrada por outros autores (IMHOFF, 2002; SILVA et al., 2002b; BRAIDA, 2004; LIMA et al., 2006; SUZUKI, 2008; MENTGES, 2010), os quais associaram a menor susceptibilidade à compactação ao elevado estado de compactação do solo, uma vez que ocorrem menores deformações quando altas pressões forem aplicadas, em função do aumento do número de pontos de contato entre as partículas e

os agregados do solo, o que torna difícil a movimentação das mesmas na medida em que a D_s aumenta.

Com a umidade do solo, o IC apresentou relação positiva e significativa ($r = 0,50$) (Figura 46b), o que também foi relatado em outras pesquisas (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA; CABEDA, 2006; SILVA et al., 2002b; MENTGES, 2010). Em geral, de acordo com Braida et al. (2010), a relação entre o índice de compressão e a umidade do solo ocorre devido ao fato de que à medida que o solo vai umedecendo, a compressibilidade cresce, pois a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas. Porém, após atingir um valor máximo, a compressibilidade decresce, pois o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e, dessa maneira, a deformação ocorre apenas com a expulsão da água do meio poroso (BRAIDA et al., 2010). Por isso, assim como a capacidade de suporte, o conhecimento da susceptibilidade do solo à compactação tem importância na adequação de práticas de uso, manejo e tráfego de máquinas, com vistas à minimização da degradação das propriedades físicas do solo (SILVA et al., 2002b).

Os conteúdos de argila, silte e argila mais silte, apresentaram relações positivas e significativas com o IC (Figuras 46c,d,e), enquanto o conteúdo de areia grossa apresentou relação negativa e significativa (Figura 46g). A composição textural determina o tipo, a forma e a distribuição do tamanho das partículas do solo e, conseqüentemente, o número de contatos entre estas, controlando, assim, a resistência do solo à deformação (HILLEL, 1998; HARTE, 2000; REICHERT et al., 2010).

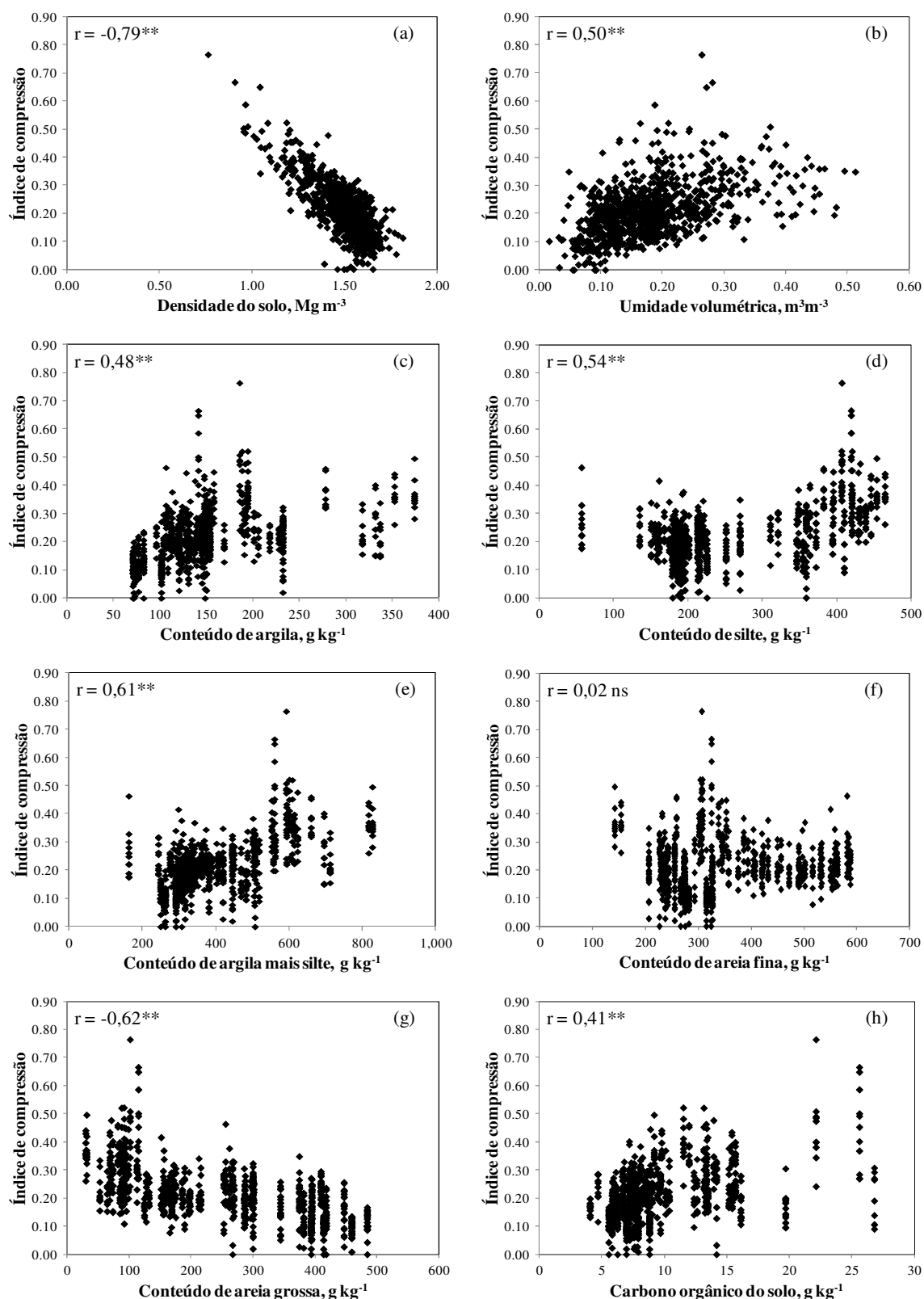


Figura 46 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre índice de compressão com a densidade do solo (a), umidade volumétrica (b), conteúdos de argila (c), silte (d), argila mais silte (e), areia fina (f), areia grossa (g) e carbono orgânico do solo (h). ******significativo a 1%; ns não significativo.

Por isso, trabalhos como de Arvidsson (1998), Imhoff (2002), Suzuki (2008) e Mentges (2010) entram em concordância com o presente estudo, demonstrando que composições texturais mais finas ocasionam aumento no índice de compressão. Além disso, solos mais argilosos, devido a sua maior capacidade de retenção de água, necessitam de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois, embora, em certos casos possam suportar pressões maiores, apresentam maior susceptibilidade à compactação adicional, quando pressões superiores à sua capacidade de suporte são aplicadas (IMHOFF, 2002; SUZUKI, 2005; SUZUKI, 2008).

Por fim, com o conteúdo de carbono orgânico, o IC apresentou relação positiva e significativa (Figura 46h), o que também é relatado por Braida (2004), Veiga et al. (2007) e Mentges (2010). Isso se deve em função da matéria orgânica reduzir a densidade do solo e, dessa forma, aumentando sua susceptibilidade à compactação, embora, também possa aumentar a coesão entre as partículas minerais, causando maior estabilidade estrutural e proporcionando maior elasticidade do solo.

Tendo em vista as relações entre o IC e as outras propriedades e atributos, procurou-se ajustar uma equação de regressão linear múltipla por *Stepwise* para estimativa da susceptibilidade do solo à compactação (Tabela 12), da mesma forma que foi realizado para outras variáveis.

Tabela 12 – Equação ajustada para estimativa do índice de compressão.

Variável Dependente	Variáveis Independentes							R ²	Syx	Valor F
	Intercepto	Ds	Argila	θ	Silte	C-org	Areia fina			
IC	1,00602	-0,5295						0,65	0,048	1407**
	0,78978	-0,4498	0,0007					0,82	0,034	1757**
	0,72132	-0,4189	0,0006	0,15985				0,84	0,033	1310**
	0,68000	-0,3990	0,0006	0,13279	0,00008			0,84	0,032	1013**
	0,73305	-0,4252	0,0006	0,14604	0,00010	-0,00188		0,85	0,032	847,7**
N = 766	0,70180	-0,4151	0,0006	0,13789	0,00012	-0,00199	0,00003	0,85	0,032	713,6**

**significativo a 1%; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa; θ : umidade volumétrica em m³ m⁻³; Ds: densidade do solo em Mg m⁻³; Argila: conteúdo de argila em g kg⁻¹; Silte: conteúdo de silte em g kg⁻¹; Areia fina: conteúdo de areia fina em g kg⁻¹; C-org: conteúdo de carbono orgânico do solo em g kg⁻¹.

A maior parte da variação do IC pode ser explicada pelas variáveis D_s e conteúdo de argila (82 %). Com o acréscimo das variáveis conteúdos de areia fina, silte, carbono orgânico e θ , houve pouca, mas significativa melhoria no ajuste da equação, resultando num ajuste de R^2 de 0,85, S_{yx} de 0,032 e valor F de 713,6.

A distribuição percentual de resíduos (Figura 47) demonstra maior tendência de superestimativa para valores mais baixos de IC, sendo maior a precisão do modelo para valores maiores de IC.

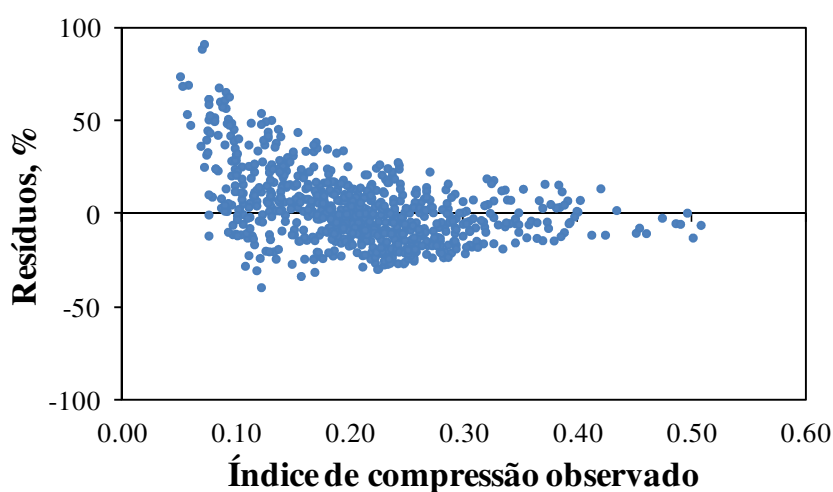


Figura 47 – Distribuição percentual dos resíduos em relação aos valores observados de índice de compressão.

3.3.3.3.3 Susceptibilidade, compressibilidade e estados de compactação do solo

Como discutido anteriormente, a D_s apresentou grande influência sobre o comportamento compressivo do solo. Em vista disso, se analisou o efeito de diferentes valores de D_s sobre a susceptibilidade à compactação e compressibilidade das quatro camadas dos cinco solos analisados. Para representar os resultados desses parâmetros, foi escolhida a tensão de água de 10 kPa, equivalente à umidade na capacidade de campo, tendo em vista que essa, na maioria dos casos, ficou acima da umidade ótima de compactação e abaixo do limite de plasticidade. Ou seja, tal tensão ficou dentro da faixa de friabilidade do solo, sendo, portanto, considerada uma condição em que o solo se encontra com menor resistência à compactação (SOANE et al., 1981; REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009; REICHERT et al., 2010).

Primeiramente, em relação à susceptibilidade do solo à compactação (Figura 48), pode-se ver que as diferentes condições de densidade no SXe afetaram mais o IC nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 40 a 60 cm, embora os valores de IC, em média, tenham sido maiores na camada de 20 a 40 cm (Figura 48a).

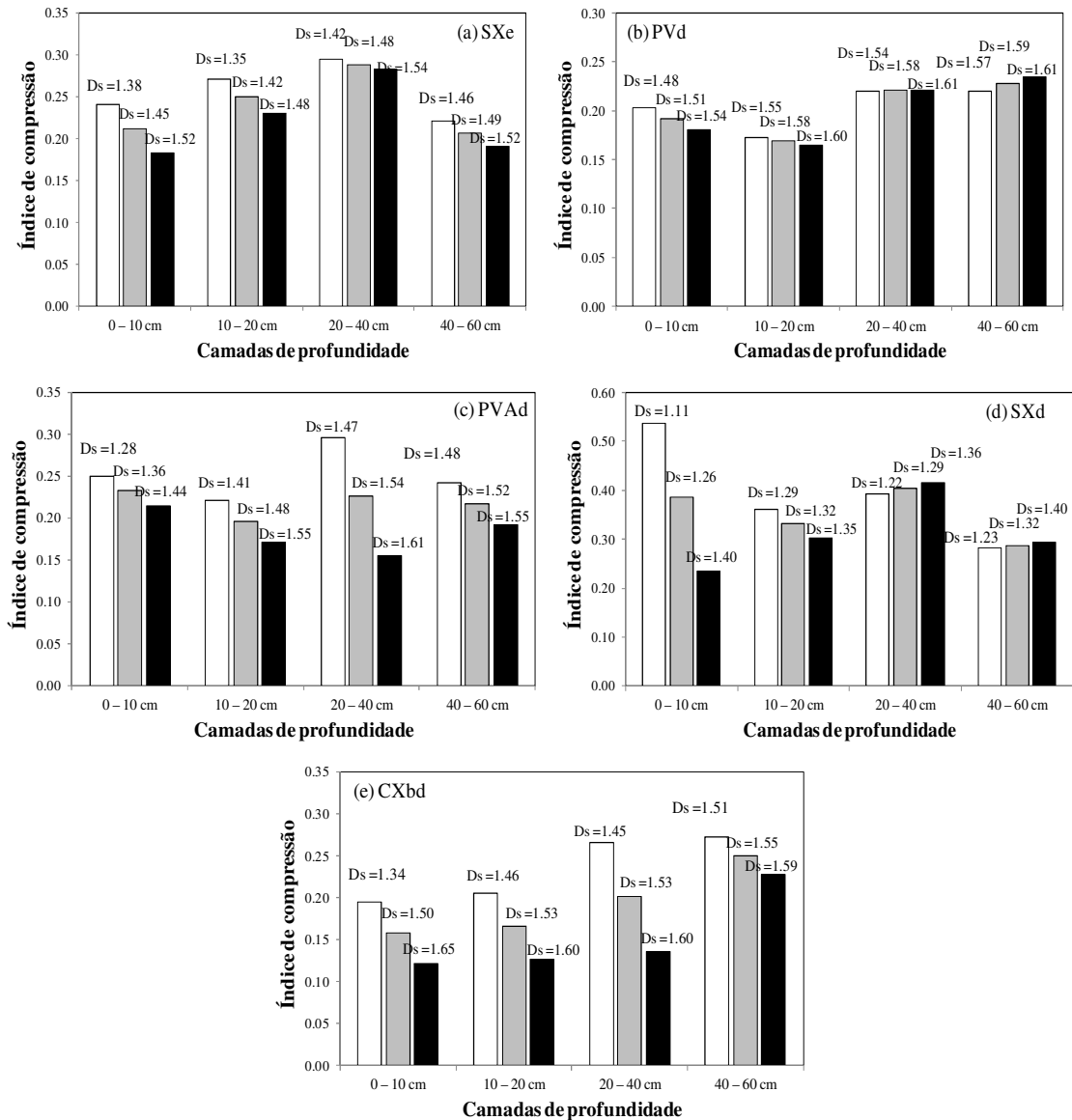


Figura 48 – Variação do índice de compressão na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo) em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas dos solos avaliados.

Considerando o PVd, na camada de 0 a 10 cm houve a maior redução do IC com a redução da Ds. Na camada de 10 a 20 cm, também o IC foi influenciado pela Ds, porém, em menor magnitude. Na camada de 20 a 40 cm, não houve diferenças em função da Ds. Já na

camada de 40 a 60 cm, aconteceu o inverso, maiores valores de IC ocorreram para os maiores valores de D_s , contudo, essa camada apresentou maior susceptibilidade à compactação (Figura 48b).

No PVAd, as diferentes densidades influenciaram o IC de todas as camadas avaliadas, se destacando a camada de 20 a 40 cm, que apresentou as maiores variações, sendo que os maiores valores de IC, em média, ocorreram na camada de 0 a 10 cm (Figura 48c).

No SXd, o efeito de diferentes densidades sobre o IC se pronunciou mais visivelmente sobre a camada de 0 a 10 cm, sendo o efeito menor na camada seguinte. As camadas mais profundas apresentaram comportamento inverso, sendo que os maiores valores de IC para este solo, ocorreram na penúltima camada (Figura 48d). No CXbd, em semelhança ao PVAd, as diferentes condições de densidade influenciaram a susceptibilidade à compactação de todas as camadas avaliadas, se sobressaindo a camada de 20 a 40 cm, onde a magnitude foi maior, sendo a camada de 40 a 60 cm a que apresentou maior susceptibilidade (Figura 48e).

O efeito de diferentes densidades sobre a compressibilidade dos solos avaliados é apresentado nas Figuras 49, 50, 51, 52 e 53, por meio das curvas de compressão e compressão normalizadas.

No SXe, na camada de 0 a 10 cm, o comportamento compressivo em função das condições de baixa, média e alta densidade é semelhante, sendo a partir da tensão normal (σ) de 50 kPa que a curva de compressão começa a sair da região elástica, passando para a região de deformação plástica. Embora o comportamento compressivo seja semelhante, em condição de D_s baixa, ocorreu maior deformação do solo, resultando em maior incremento da D_s , com base na curva de compressão normalizada. Na camada de 10 a 20 cm, o comportamento foi semelhante, sendo a condição de D_s baixa a que resultou em maior incremento da D_s , ocorrendo após a σ de 100 kPa. Nas camadas inferiores, diferentes condições de densidade não resultaram maior deformação do solo (Figura 49).

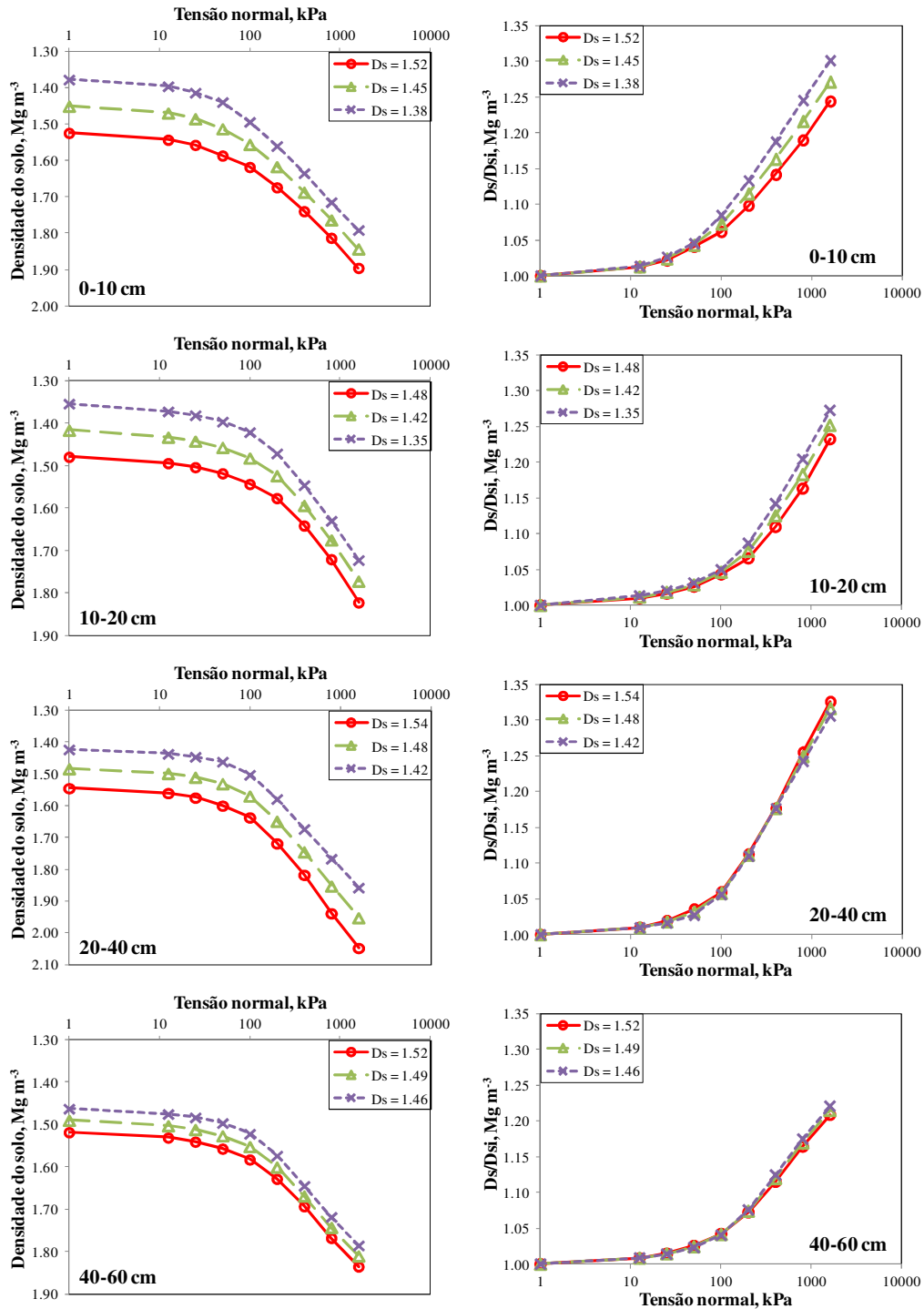


Figura 49 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).

No PVd (Figura 50), na camada de 0 a 10 cm, a partir da σ de 100 kPa, as curvas começaram a entrar na região de deformação plástica e, após a σ de 200 até 1600 kPa, a condição de D_s baixa resultou no mesmo valor de D_s que as outras condições. Ou seja, com o aumento da σ , a D_s apresentou maior incremento. Nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm, o

comportamento compressivo entre as condições de D_s foi semelhante, sendo o mesmo em relação ao incremento de D_s . Enquanto na camada de 40 a 60 cm, já após a σ de 50 kPa, a condição de D_s baixa resultou em valores de D_s semelhantes às condições de maior D_s e, assim, resultou em maior incremento.

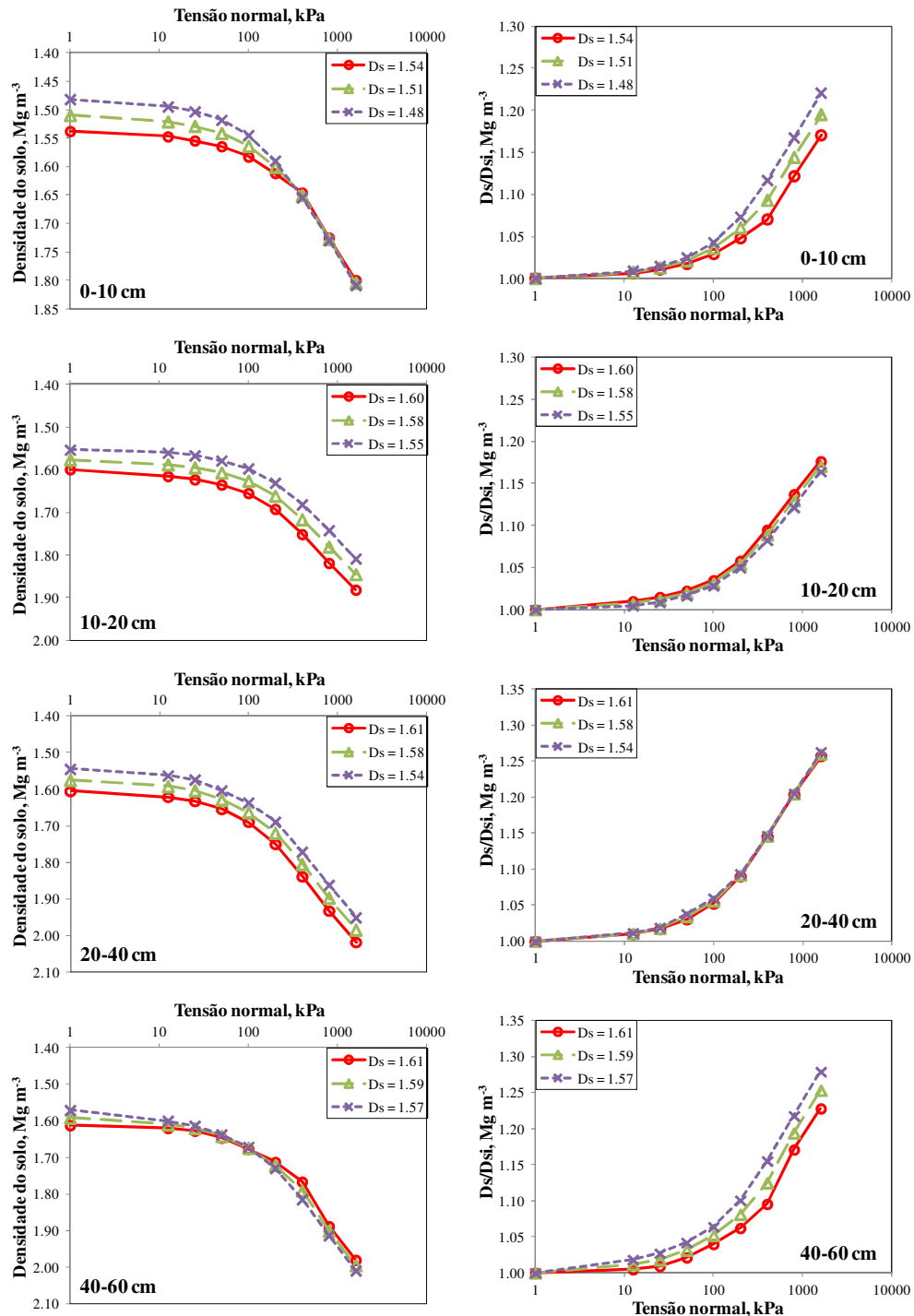


Figura 50 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd).

No PVAd, embora nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm o comportamento compressivo entre as condições de D_s tenha sido semelhante, em todas as camadas, a condição de D_s baixa resultou em maior incremento e deformação do solo ao final, destacando-se, como pode ser visto, a maior diferença na camada de 20 a 40 cm (Figura 51).

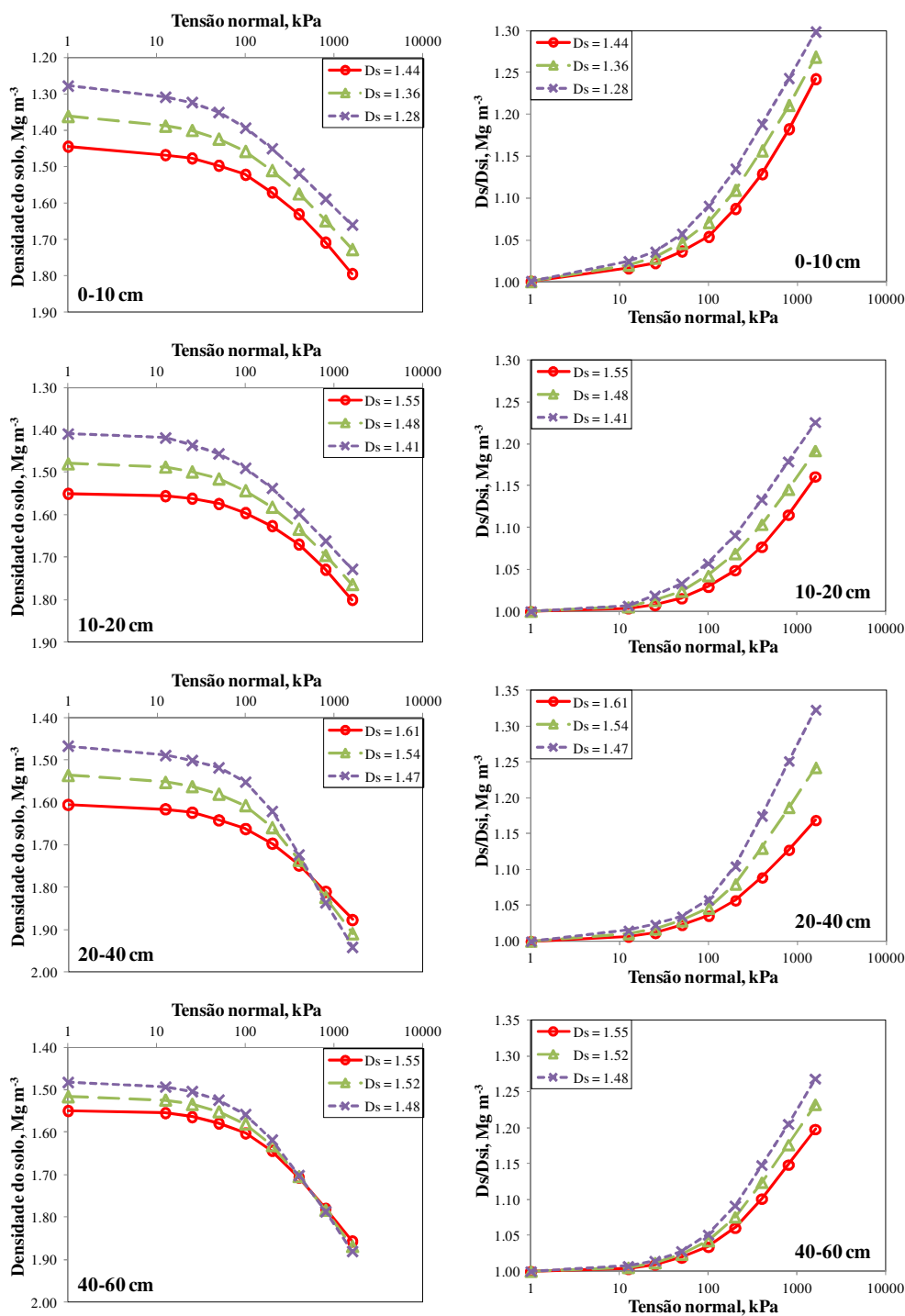


Figura 51 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).

Fato parecido ao PVAd pode ser observado no SXd (Figura 52), onde o comportamento compressivo foi semelhante entre as diferentes densidades, somente nas camadas de 0 a 10 e 40 a 60 cm, sendo que, para todas as camadas, a condição de D_s baixa resultou em maior incremento de D_s e deformação, principalmente na camada de 0 a 10 cm.

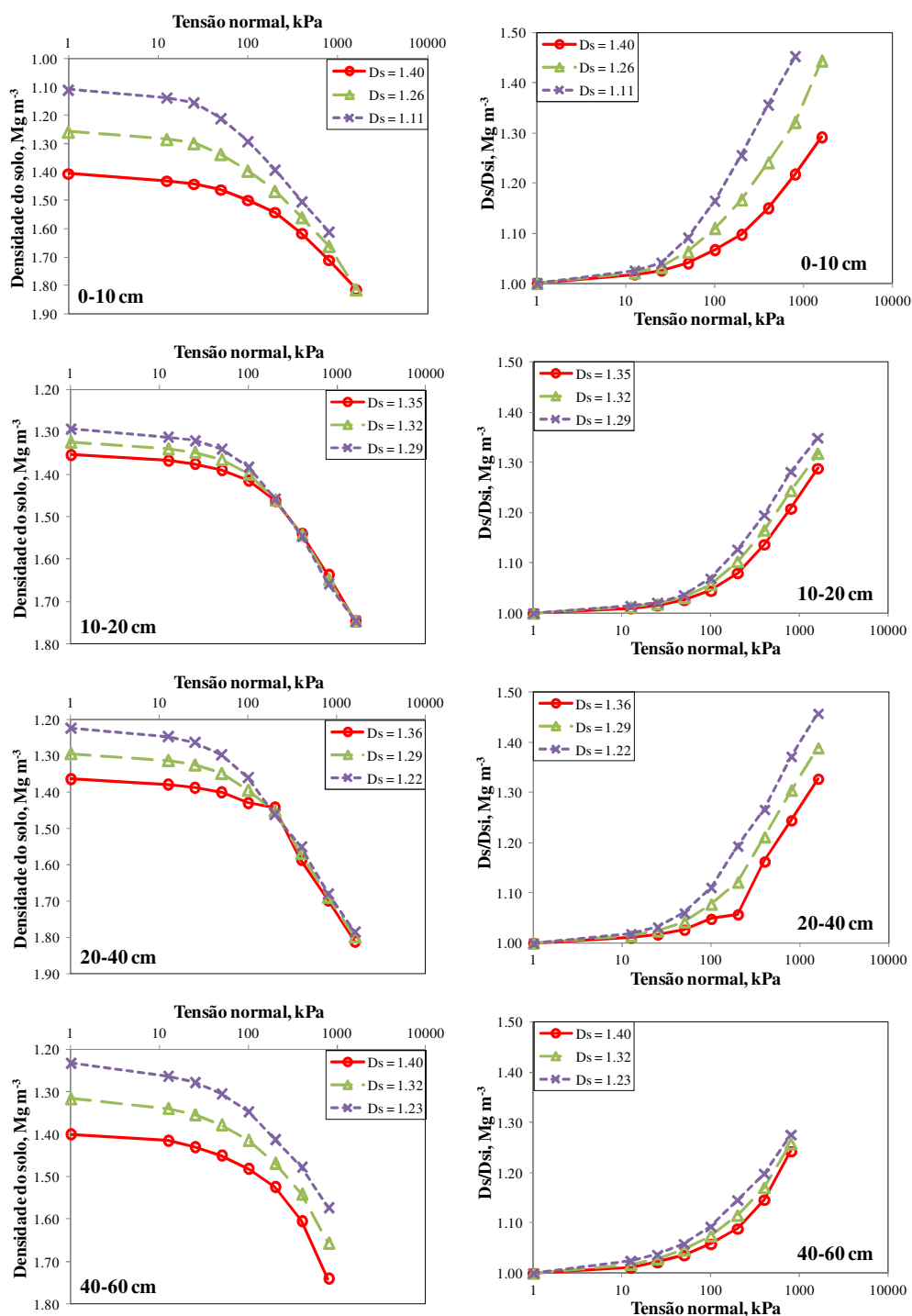


Figura 52 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd).

Por fim, no CXbd, resultados análogos aos solos anteriores também foram encontrados, embora de maneira mais discreta na camada de solo mais profunda (Figura 53).

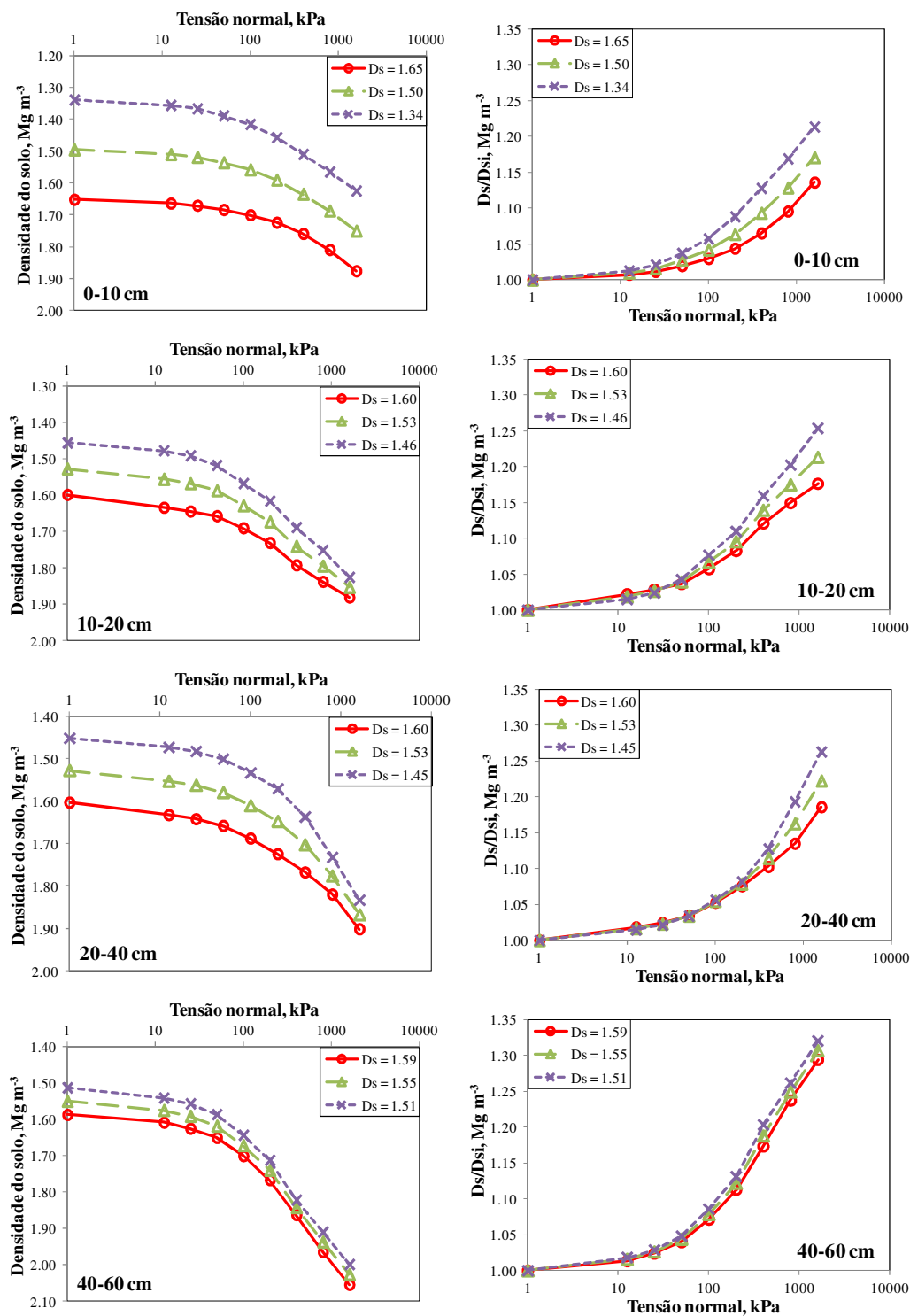


Figura 53 – Curvas de compressão (esquerda) e curvas de compressão normalizadas (direita) na tensão de água de 10 kPa (capacidade de campo), em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd).

Em geral, o comportamento compressivo mostrou que o aumento da tensão normal submetida ao solo, aumentou sua deformação e, em consequência, incrementou sua densidade, o que significa um aumento no estado de compactação. Isso demonstra a estreita relação entre a condição de trafegabilidade dos solos e as possíveis alterações na qualidade física, uma vez que o aumento no estado de compactação afeta diretamente as propriedades físico-hídricas (IHO, CRA, porosidade), como discutido anteriormente. Assim, devido à relação entre os indicadores de trafegabilidade e qualidade física, ficou confirmada a hipótese de que a alteração de qualquer propriedade do solo reflete na alteração de outra, demonstrando a interdependência entre as propriedades físico-hídrico-mecânicas.

3.3.3.3.4 Estimativa de pressões críticas para o crescimento de plantas

Com a confirmação da dependência da pressão de pré-consolidação em relação à umidade e densidade do solo e, em sequência, com os ajustes de equações para estimativa da σ_p em função da θ e D_s para cada solo e camada (Tabela 10, p. 90), foram substituídas nas equações o valor de D_s pela $D_{s,IHO}$, permitindo, dessa forma, estimar a capacidade de suporte de carga do solo, levando em consideração a qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas; isto é, a pressão crítica (σ_{cr}) que pode ser suportada pelo solo. Contudo, em razão da σ_p também variar com a umidade, foi determinada a faixa de umidade que incorporou as limitações para o crescimento das plantas, sendo esta correspondente aos valores de umidade na amplitude máxima do IHO nos limites superior e inferior, assim, obtendo o intervalo de pressão crítica para todas as camadas dos solos avaliados (Figuras 54, 55, 56, 57, 58).

Utilizando valores de $D_{s,IHO_{RP2MPa}}$, no SXe, o intervalo de σ_{cr} variou de 66 a 146 kPa, 159 a 247 kPa, 81 a 160 kPa e de 95 a 219 kPa para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente, considerando os valores de umidade nos limites superior e inferior do IHO (Figura 54). Observa-se, também, que, neste solo, a umidade ótima de compactação ficou entre os LS e LI, resultando em valores intermediários de σ_{cr} .

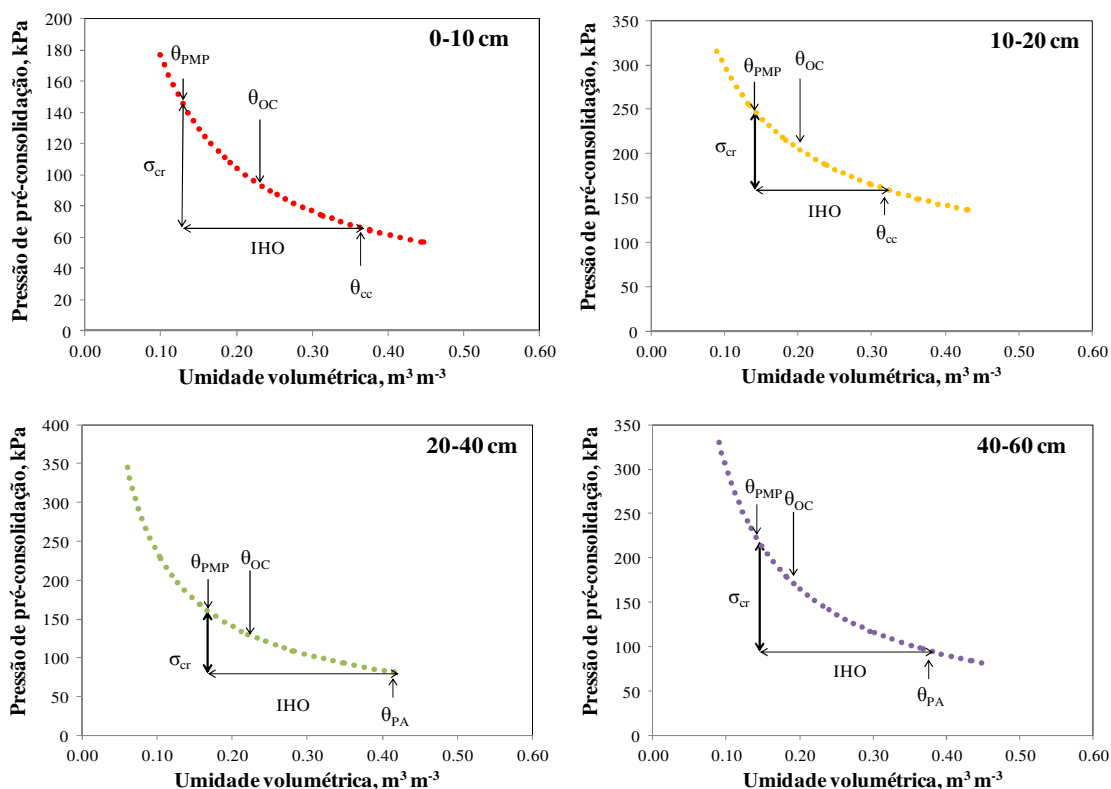


Figura 54 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXE); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.

No PVD, o intervalo de σ_{cr} variou de 120 a 210 kPa, 206 a 285 kPa, 149 a 224 kPa e de 124 a 190 kPa para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente, nos limites superior e inferior (Figura 55). A umidade ótima de compactação ficou entre os LS e LI, resultando em valores intermediários de σ_{cr} somente nas camadas superficiais de solo. Nas camadas mais profundas, a θ_{OC} ficou próxima do LS, que foi a θ_{CC} .

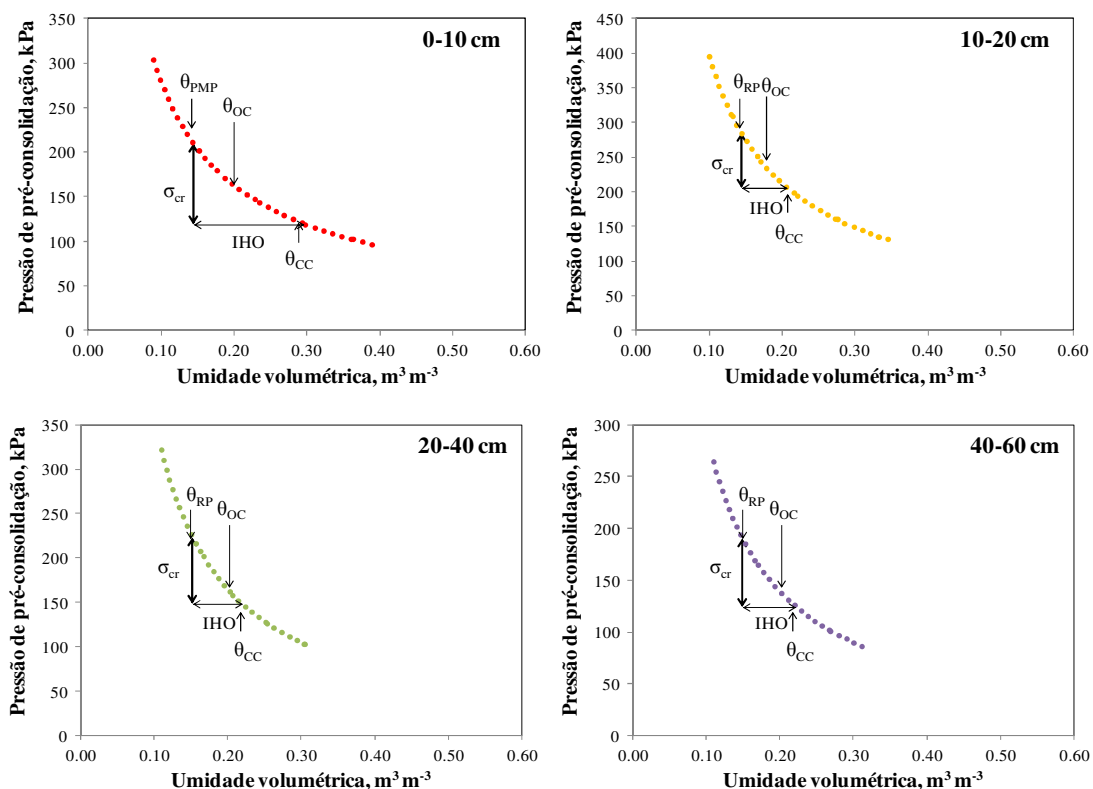


Figura 55 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.

No PVAd, o intervalo de σ_{cr} variou de 132 a 187 kPa, 178 a 272 kPa, 95 a 180 kPa e de 73 a 148 kPa para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente, nos limites superior e inferior (Figura 56). Neste solo, a umidade ótima de compactação ficou entre os LS e LI somente na camada de solo de 0 a 10 cm. Na camada de 10 a 20 cm, esta se encontrou próxima do LS que foi a θ_{CC} . Nas camadas mais profundas, a θ_{OC} ficou próxima do LI, que foi a θ_{PMP} .

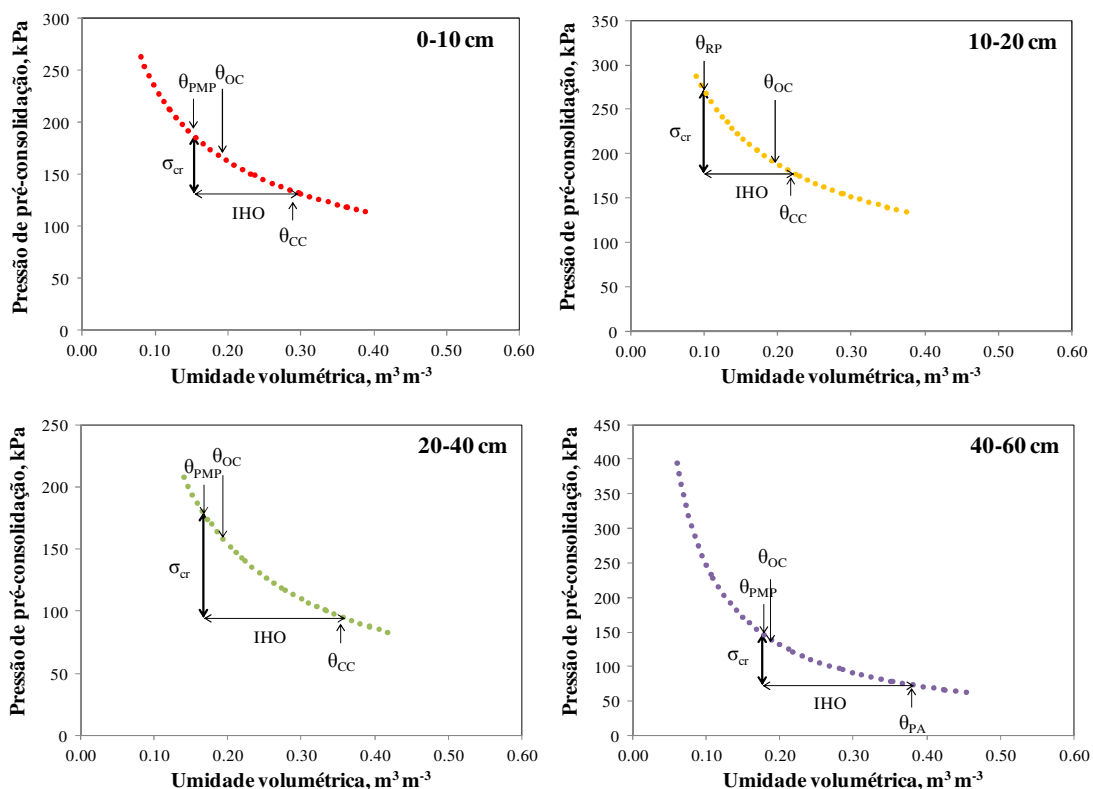


Figura 56 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.

No SXd, o intervalo de σ_{cr} variou de 119 a 193 kPa, 179 a 389 kPa, 118 a 218 kPa e de 107 a 149 kPa para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente, no limites superior e inferior (Figura 57). A umidade ótima de compactação, na camada de 0 a 10 cm se encontrou próxima do LS, que foi a θ_{CC} . Nas camadas de 10 a 20 e 20 a 40 cm, ficou entre os LS e LI. Já na camada mais profunda, se encontrou um pouco antes do LI, que foi a θ_{PMP} .

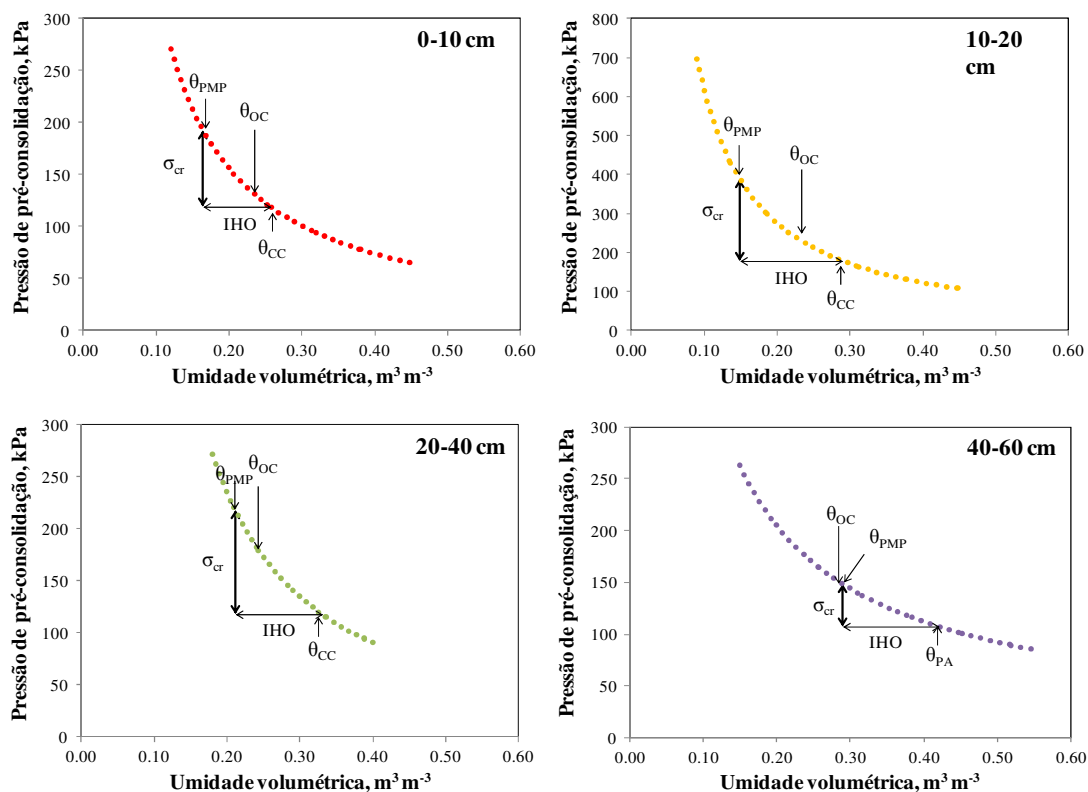


Figura 57 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.

Finalizando, no CXbd, o intervalo de σ_{cr} variou de 113 a 150 kPa, 94 a 158 kPa, 132 a 262 kPa e de 112 a 209 kPa para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente, nos limites superior e inferior (Figura 58). A umidade ótima de compactação, em todas as camadas, se encontrou após ou próxima ao LS, neste solo.

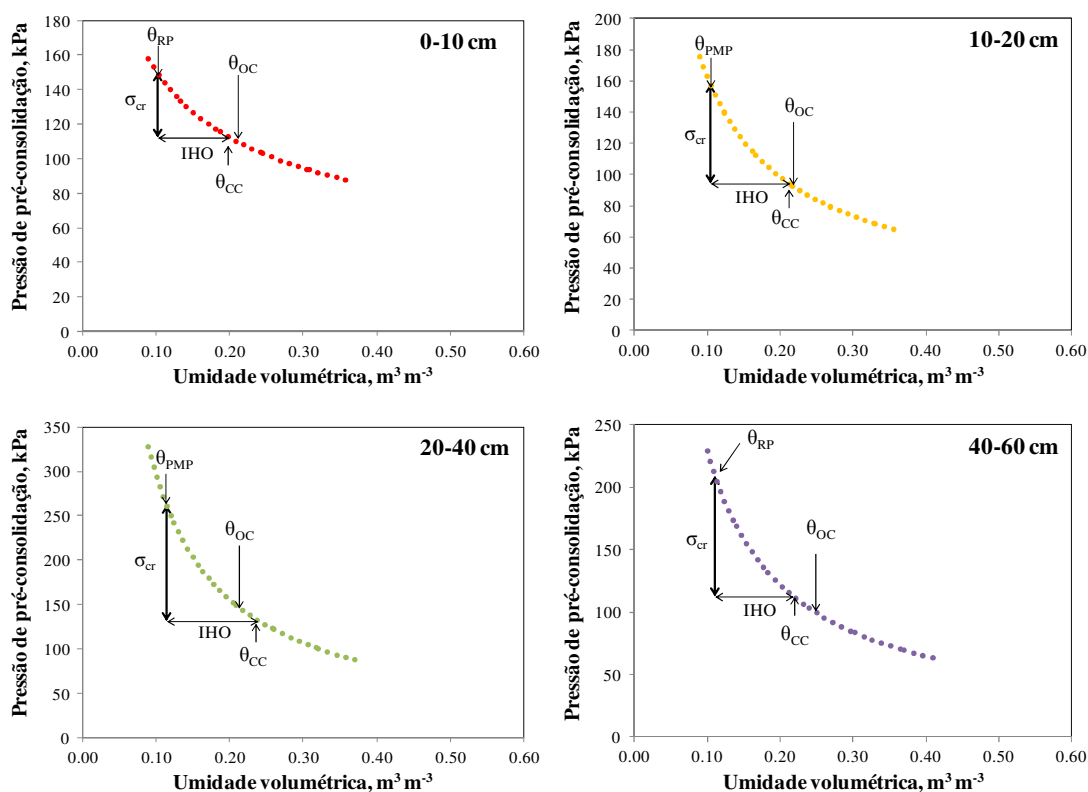


Figura 58 – Variação da pressão de pré-consolidação em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 2 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 2 MPa; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.

Recalculando-se a σ_{cr} utilizando valores de $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, todos os valores de pressão crítica aumentaram (Anexos 6, 7, 8, 9 e 10), uma vez que os valores de $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$ são superiores em relação aos valores de $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$.

Em geral, os valores de σ_{cr} calculados com $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ no limite superior variaram em torno de 100 a 150 kPa, sendo classificados como altos a muito altos, de acordo com Horn e Fleige (2003), e no limite inferior de 190 a 240 kPa, sendo classificados como extremamente altos (Tabela 13). Porém, tendo em vista que as máquinas florestais utilizadas na colheita da madeira podem impor pressões em torno de 400 kPa sobre o solo (HORN et al., 2004), esses valores ainda não são suficientes para que não haja compactação adicional dos solos quando forem submetidos ao tráfego.

Tabela 13 – Valores de pressão de pré-consolidação crítica (kPa) nos limites superior e inferior, considerando a densidade crítica com resistência à penetração crítica de 2 MPa e 3 MPa para as quatro camadas dos solos avaliados.

Solo	Camada (cm)					Camada (cm)				
	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	Média	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	Média
Limite superior						Limite inferior				
DscIHO $\theta_{RP} = 2$ MPa										
SXe	65,7	159,3	80,9	94,6	100,1	145,7	247,3	160,4	218,7	193,0
PVd	119,5	206,1	148,5	124,2	149,6	209,7	284,6	223,5	190,4	227,1
PVAd	132,1	177,8	94,6	73,2	119,4	187,0	272,4	179,5	147,7	196,7
SXd	118,6	178,7	117,8	107,2	130,6	192,8	388,9	218,1	148,5	237,1
CXbd	112,5	94,0	131,9	112,4	112,7	150,0	158,3	261,8	209,2	194,8
DscIHO $\theta_{RP} = 3$ MPa										
SXe	100,9	198,9	98,2	119,9	129,5	223,8	308,9	194,6	277,2	251,1
PVd	175,0	229,0	171,9	132,4	177,1	307,0	395,1	332,7	259,0	323,4
PVAd	179,3	250,4	109,3	78,4	154,3	253,7	402,8	207,4	158,2	255,5
SXd	129,1	242,7	152,3	124,2	162,1	209,9	528,2	282,1	172,0	298,1
CXbd	137,6	100,0	141,9	129,3	127,2	183,6	168,4	281,4	268,2	225,4

SXe: Planossolo Háplico Eutrófico; PVd: Argissolo Vermelho Distrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; SXd: Planossolo Háplico Distrófico gleissólico; CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Nesse sentido, Horn et al. (2004) citam que a possibilidade de máquinas de colheita florestal não causarem compactação é quase nula. Portanto, uma 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. Além disso, outra solução mitigadora importante seria a disposição dos resíduos da colheita da madeira sobre os canais de tráfego, uma vez que os resíduos contribuem na distribuição das pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas sobre o solo, resultando em maior capacidade de suporte do solo e, conseqüentemente, em menor compactação (WRONSKI, 1990; SEIXAS et al., 1998; AMPOORTER et al., 2007. ELIASSON; WÄSTERLUND, 2007; SILVA et al., 2007).

Os valores de σ_{cr} calculados com $D_{scIHO_{RP3MPa}}$ não ficaram próximos à pressão exercida pelas máquinas de acordo com Horn et al. (2004). Por isso, o agendamento, de acordo com as condições de umidade; o tráfego em trilhas permanentes; a disposição de resíduos e o monitoramento e gerenciamento de impactos sobre o solo são medidas que podem auxiliar na minimização do problema de compactação de solos florestais, reduzindo custos e buscando a sustentabilidade.

3.4 Conclusões

De acordo com as análises e discussão dos resultados, as principais conclusões deste estudo foram:

- A amplitude do intervalo hídrico ótimo variou com o tipo de solo e camada de profundidade avaliada e o uso de resistência à penetração crítica de 3 MPa como um dos limites inferiores, recomendada para espécies florestais, aumentou essa amplitude em relação ao uso de resistência à penetração crítica de 2 MPa;

- A densidade crítica do solo, independente da resistência à penetração crítica utilizada, se relacionou com o conteúdo de silte e carbono orgânico do solo, podendo, dessa forma, a $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ ser estimada pela equação $D_{s_c}IHO_{RP2MPa} = 1,76715 - 0,000522 \text{ Silte} - 0,00786 \text{ C-org}$ ($R^2 = 0,91$); e a $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, pela equação $D_{s_c}IHO_{RP2MPa} = 1,90036 - 0,000532 \text{ Silte} - 0,00828 \text{ C-org}$ ($R^2 = 0,64$);

- O aumento do estado de compactação, representado por diferentes valores de densidade, influenciou diretamente os indicadores de qualidade física avaliados, diminuindo a amplitude do IHO e alterando a curva de retenção e a distribuição de tamanho de poros. Entretanto, cada solo respondeu diferentemente, em maior ou menor magnitude ao aumento do estado de compactação;

- Os parâmetros obtidos pelo ensaio de Proctor Normal, densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação, e os limites de consistência, se apresentaram dependentes da composição textural dos solos, assim, se pode estimar a densidade máxima do solo pela equação $D_{s_{MAX}} = 2,02836 - 0,024891 \text{ C-org}$ ($R^2 = 0,91$); a umidade ótima de compactação pela equação $U_{oc} = 0,07504 + 0,000115 \text{ Argila+Silte}$ ($R^2 = 0,68$); o limite de liquidez por $LL = 0,02285 + 0,000217 \text{ Argila+Silte} + 0,00624 \text{ C-org} + 0,00025 \text{ Argila}$ ($R^2 = 0,94$); o limite de plasticidade por $LP = 0,11247 + 0,00587 \text{ C-org} + 0,00022 \text{ Argila} - 0,00010 \text{ Areia grossa}$ ($R^2 = 0,82$); e a relação entre umidade ótima de compactação e o limite de plasticidade por $U_{oc}/LP = 0,23166 - 0,000013 \text{ Argila}^2 + 0,00466 \text{ Argila}$ ($R^2 = 0,84$);

- A relação grau de compactação e densidade crítica do solo foi independente de atributos texturais, mostrando que, para espécies florestais, é recomendável o uso de RP crítica de 3 MPa para cálculo do IHO e obtenção da densidade crítica, sendo que a partir de 90 % do GC, teoricamente, haverá restrições ao desenvolvimento radicular de espécies florestais;

- Os indicadores de trafegabilidade representados pela capacidade de suporte, expressa pela pressão de pré-consolidação, e susceptibilidade do solo à compactação, expressa pelo índice de compressão, foram dependentes das propriedades densidade e umidade, além

da textura do solo. A pressão de pré-consolidação pode ser estimada em função da densidade e umidade para cada tipo de solo e camada de profundidade avaliada, sendo possível, também, estimá-la independentemente do tipo de solo pela equação $\text{Ln}(\sigma_p) = 1,59372 - 0,78096 \text{Ln}(\theta) + 0,31125 \text{Ln}(\text{Argila}+\text{Silte}) + 2,41808 \text{Ln}(\text{Ds}) - 0,21318 \text{Ln}(\text{Areia grossa}) + 0,13223 \text{C-org}$ ($R^2 = 0,69$); e o índice de compressão pela equação $\text{IC} = 0,70180 - 0,4151 \text{Ds} + 0,0006 \text{Argila} + 0,13789 \theta + 0,00012 \text{Silte} - 0,00199 \text{C-org} + 0,00003 \text{Areia fina}$ ($R^2 = 0,85$);

– Os indicadores de trafegabilidade se mostraram influenciados pelo estado de compactação dos solos, uma vez que quanto maior foi o estado de compactação, maior foi a capacidade de suporte, menor a susceptibilidade à compactação e maior a deformação dos solos. Contudo, a resposta dos solos quanto ao estado de compactação foi variável quanto ao seu tipo e camada de profundidade avaliada;

– A relação entre a capacidade de suporte e intervalo hídrico ótimo permitiu estimar a faixa de pressão crítica dos solos, a qual representou a pressão máxima que pode ser imposta aos solos, em função da condição de umidade, sem que ocorra degradação da qualidade física considerada restritiva ao crescimento de plantas. Portanto, pode ser um indicador útil para o planejamento de operações de colheita da madeira, visando à melhoria da produção e promoção da sustentabilidade florestal.

4 ESTUDO II

FLUXOS DE ÁGUA, AR E DEFORMAÇÃO DO SOLO APÓS TRÁFEGO DE HARVESTER E FORWARDER EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus saligna* Smith

4.1 Introdução

No início da década de 90, as operações de colheita da madeira intensificaram-se consideravelmente devido à abertura do mercado para importação de máquinas. Com a possibilidade de aquisição de máquinas de alta tecnologia, as empresas do setor florestal obtiveram significativas melhorias nos sistemas produtivos, alcançando altos índices de qualidade e produtividade, reduzindo custos e trazendo melhores condições de trabalho aos operadores em termos de segurança e ergonomia. Entretanto, a tendência no uso de máquinas cada vez com maior tamanho, potência e capacidade produtiva, é uma preocupação em virtude de problemas ambientais, pois, dessa forma, coloca-se em risco a conservação dos recursos naturais e a sustentabilidade dos sítios florestais.

O tráfego intenso de máquinas pesadas durante as operações de colheita da madeira tem induzido à compactação do solo, devido às pressões, às vibrações e às tensões cisalhantes exercidas serem superiores às que os solos podem suportar (KOZLOWSKI, 2000). Com isso, sérias modificações em suas características estruturais e funcionais ocorrem, repercutindo no ecossistema florestal, com prejuízos ao potencial produtivo das áreas.

Dentre as principais alterações observadas decorrentes da compactação, pode-se destacar o aumento da densidade e resistência mecânica do solo e a redução da porosidade total, diminuindo, principalmente, a quantidade de macroporos em favor de poros menores (microporos) (SEIXAS, 1988; TEEPE et al., 2003). Por conseguinte, a redução do tamanho dos poros conduz a maior retenção de água pelo solo, sobretudo em altos potenciais matriciais e, dessa maneira, pode haver comprometimento das trocas gasosas (BALLARD, 2000). Isso é reforçado, tendo em vista que uma porosidade de aeração de, no mínimo, 10 % é, teoricamente, pré-requisito para que haja suficiente difusão de ar, atividade microbiana e crescimento de raízes (ERICKSON, 1982; KOOREVAAR et al., 1983). Além disso, com o aumento da deformação do solo e diminuição da continuidade de poros, também ocorre redução do movimento interno de água, que pode ser traduzida em redução da condutividade

hidráulica em 80 % ou mais (BENTHAUS; MATTHIES, 1993; OLIVEIRA et al., 1998) e, também, as taxas de infiltração de 11,4 cm h⁻¹ em solo não perturbado que passam para 1,1 cm h⁻¹ em solo submetido ao tráfego de máquinas (DICKERSON, 1976), e, assim, aumentam o potencial de erosão e de alteração no balanço hidrológico (HARR et al., 1979).

Dentro desse contexto, diversas pesquisas foram realizadas visando a quantificar os efeitos da compactação e propor medidas para sua minimização. Entretanto, a maioria concentrou-se no estudo do uso de diferentes equipamentos com base na pressão de contato sobre o solo, ou em avaliar a susceptibilidade do solo à compactação com base em propriedades como textura e densidade (HORWARD et al., 1981; McNABB et al., 2001). O simples cálculo da pressão de contato estática dos equipamentos de colheita da madeira sobre o solo pode não apresentar uma relação precisa com a pressão dinâmica que as máquinas exercem durante o tráfego (LYSNE; BURDIT, 1983), e, por isso, pode não se relacionar com os diversos efeitos da compactação (FROELICH, 1980). A susceptibilidade do solo à compactação, embora seja evidente a influência de propriedades como textura e densidade, varia, significativamente, em função das condições iniciais de umidade e de outras propriedades, bem como, por haver inter-relação entre estas. Por isso, a avaliação de propriedades mecânicas, como a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dos solos, contribui à uma melhor compreensão sobre os processos de deformação e as relações entre os diferentes tipos de solos (McNABB; BOERSMA, 1996; McNABB et al., 2001).

Devido à importância do entendimento do comportamento mecânico do solo e suas relações com os fluxos de água e ar, novas pesquisas são necessárias para quantificar mais precisamente os efeitos do tráfego de máquinas de colheita florestal, possibilitando a busca de um melhor manejo das condições físicas do solo, minimizando os danos ao ecossistema florestal e contribuindo com a melhoria na produção de madeira.

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas de colheita da madeira no que diz respeito à deformação, fluxos de água e de ar de um Cambissolo Háptico em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm., e relacionar as propriedades e parâmetros físico-mecânicos do solo.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Caracterização da área de estudo

4.2.1.1 Localização e clima

O presente trabalho foi conduzido em áreas operacionais de colheita da madeira, pertencentes à empresa CMPC Celulose Riograndense, localizadas no Horto Florestal Erval I, município de Dom Feliciano, Estado do Rio Grande do Sul.

4.2.1.2 Histórico, solo e povoamento florestal

Como citado no Estudo I (p. 27), a área de estudo caracteriza-se por apresentar povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. em segunda rotação, conduzida pelo regime de manejo florestal de talhadia, sendo a colheita da primeira rotação realizada de forma mecanizada. Os dados referentes às características do povoamento florestal são discriminados na Tabela 14.

Tabela 14 – Características do povoamento florestal.

Espécie	<i>Eucalyptus saligna</i> Smith
Ciclo de rotação	Segunda
Idade de corte da rotação (anos)	±7
Área basal (m ² ha ⁻¹)	37,14
Número médio de árvores por ha	1088
DAP médio (cm)	19,31
Altura média (m)	27,76
Volume médio individual (m ³)	0,36
Volume médio por ha (m ³ ha ⁻¹)	387,21
Peso médio individual (Mg)	0,20

O solo da área foi classificado como sendo um Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) de textura franco-arenosa, com conteúdo médio de 122, 227, 269 e 382 g kg⁻¹ de argila, silte, areia grossa e areia fina, respectivamente e carbono orgânico do solo (C-org) de 8,30 g kg⁻¹, sendo o relevo característico plano a suave ondulado.

4.2.1.3 Sistema de colheita da madeira

Foi avaliado o sistema de Toras Curtas (*Cut-to-length*) (Figura 59), no qual um trator florestal *Harvester* (Figura 60) executa a derrubada e processamento das árvores em toras, no presente caso, em eitos de seis linhas de árvores, prosseguindo com a extração das toras por baldeio até a margem da estrada por um *Forwarder* (Figura 61). A Tabela 15 apresenta maiores detalhes em relação às características das máquinas de colheita da madeira utilizadas. A área de contato e a pressão estática dos rodados das máquinas sobre o solo são discutidas mais adiante.

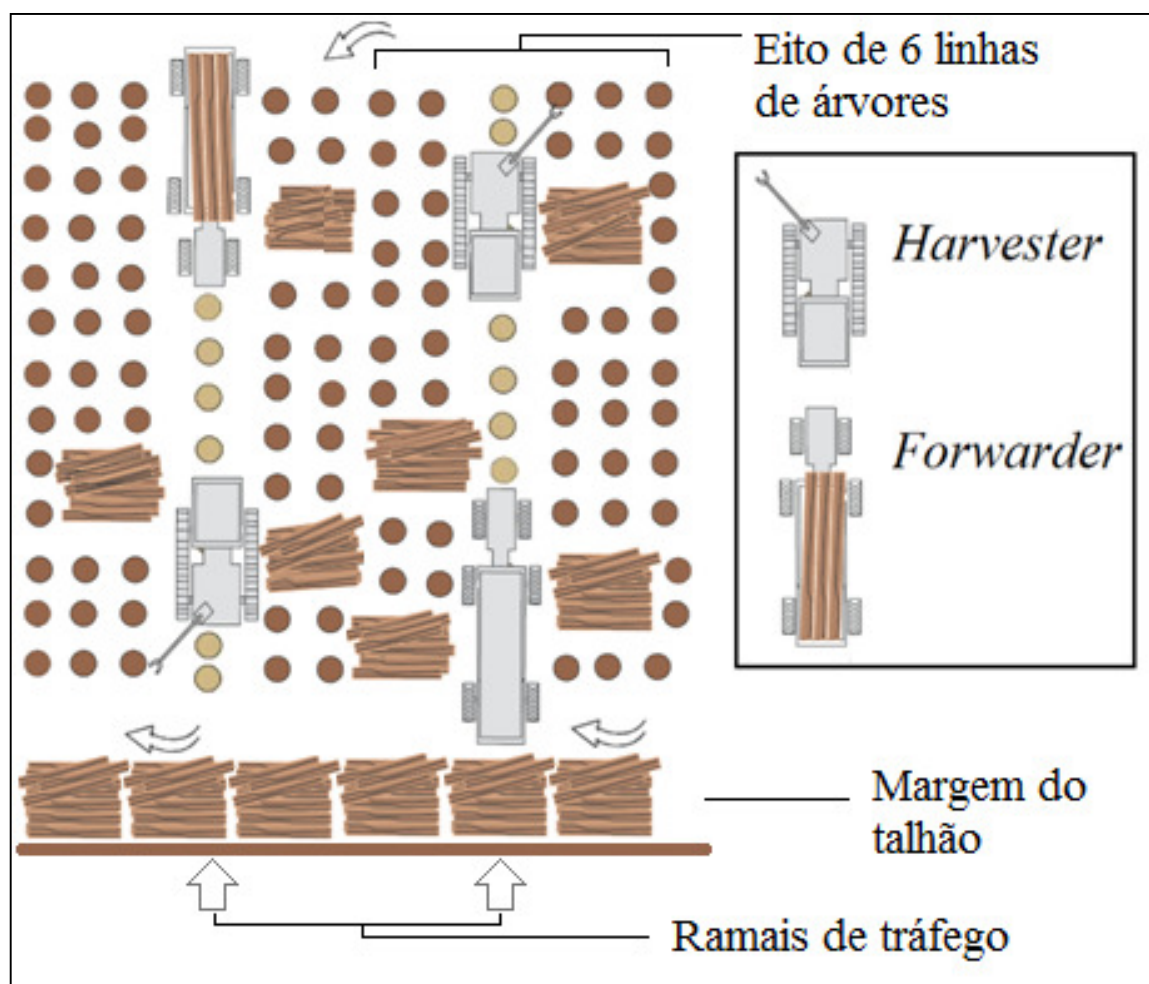


Figura 59 – Esquema de derrubada, processamento e extração das árvores pelo sistema de colheita da madeira de Toras Curtas (*Cut-to-length*) (Adaptado de Silva, 2003b).



Figura 60 – Trator florestal *Harvester* utilizado para a derrubada e processamento das árvores.



Figura 61 – Trator florestal *Forwarder* utilizado para a extração da madeira para a margem da estrada.

Tabela 15 – Características das máquinas de colheita da madeira avaliadas.

Máquina (Operação)	Especificações e Características
<i>Harvester</i> (Derrubada e processamento)	Máquina-base: Escavadeira marca <i>Volvo</i> , modelo EC210, motor <i>Cummins</i> B5.9-C (Diesel), potência nominal de 143 hp / 107 kW, peso operacional de 21,7 Mg, rodados de esteiras (0,6 x 4,46 m, passo de 0,05 m) e distância entre rodados de 1,80 m. Equipamento: Cabeçote marca <i>Valmet</i> , modelo 370E e peso de 1,6 Mg.
<i>Forwarder</i> (Baldeio)	Marca <i>Valmet</i> , modelo 89.3, motor <i>Valmet</i> 74 CTA (Diesel), potência nominal de 201 hp / 150 kW, peso operacional de 19,1 Mg, rodados de pneus (750/55 x 26,5 com pressão de 73 psi / 503 kPa), tração 8 x 8, distância entre rodados de 1,70 m, compartimento de carga com capacidade bruta de 18,0 Mg, área de 5,6 a 6,0 m ² , grua com alcance máximo de 7,50 m de distância horizontal e 8,5 m de altura.

4.2.2. Procedimento amostral e coleta de dados

Para avaliar os efeitos de diferentes intensidades de tráfego das máquinas sobre o solo, primeiramente, procuraram-se locais em que a variabilidade física e textural do solo fosse a menor possível. Na área do experimento, devido ao povoamento da área ser de segunda rotação e a colheita anterior ter sido feita de forma mecanizada, pressupôs-se que o solo já sofreu pressões prévias pelo tráfego, e, com isso, a variabilidade do solo poderia ser alta. Devido a essa consideração, para a realização dos ensaios de tráfego nesse solo, considerou-se que a distância de extração de toda a área do local a ser escolhido deveria possuir semelhança, uma vez que a distância de extração determina a quantidade de viagens que a máquina de extração realiza durante sua operação e, assim, a escolha de um local para os ensaios em que tenha havido diferentes passagens de máquinas no passado poderia comprometer a pesquisa. Ao final, o local escolhido apresentou distância de extração em média de 70 m (Figura 62).



Figura 62 – Aspecto do local selecionado na área do experimento.

No local selecionado, uma área de floresta foi isolada e deixada em pé, servindo de testemunha. No restante do local todas as árvores foram derrubadas e processadas somente com uma passada do *Harvester*. Em seguida, foram distribuídos três blocos nos quais foram instaladas parcelas amostrais de 5 m de largura por 20 m de comprimento para cada tratamento analisado (Figura 63), sendo:

- **ST**: sem tráfego das máquinas (Testemunha);
- **H**: 1 passada do *Harvester*;
- **H + 1F**: 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*;
- **H + 2F**: 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*;
- **H + 4F**: 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*;
- **H + 8F**: 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*;
- **H + 16F**: 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*;
- **H + 32F**: 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*.

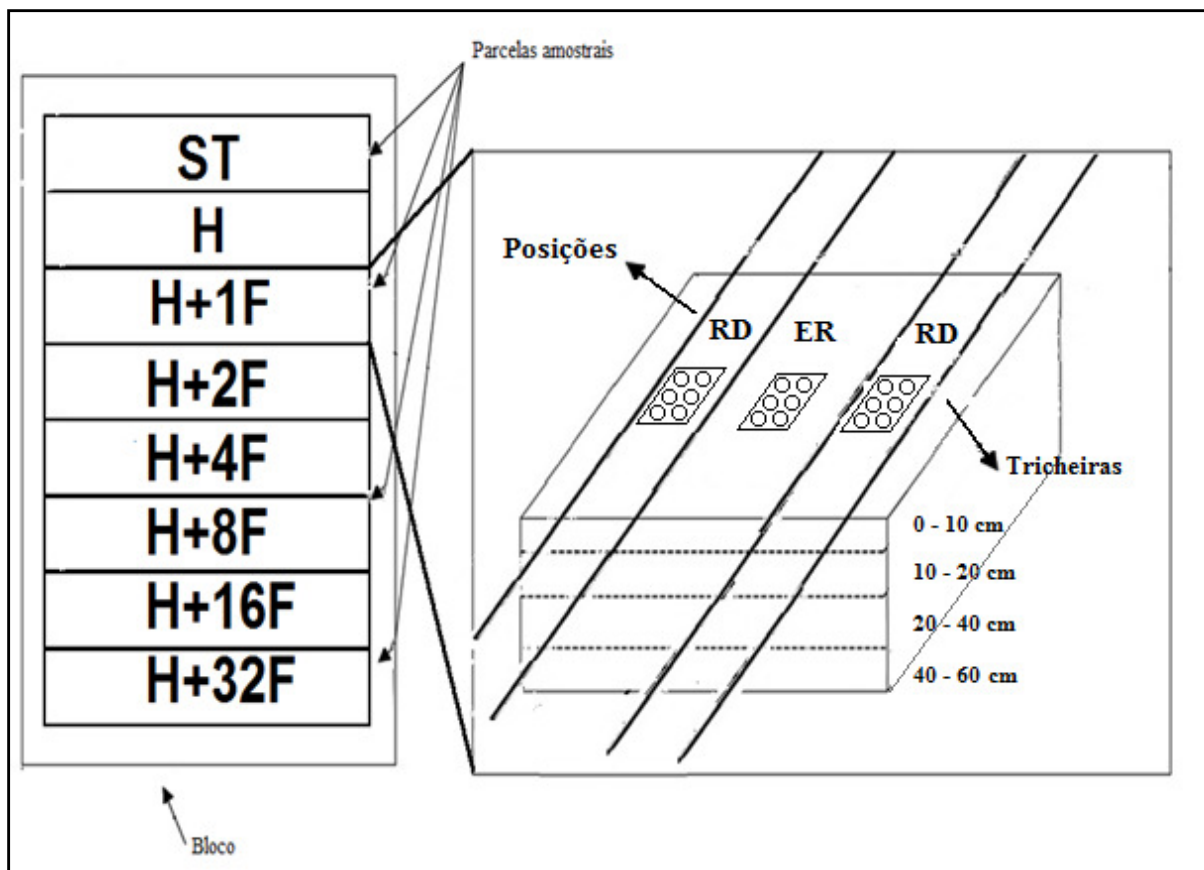


Figura 63 – Desenho do esquema amostral, mostrando a distribuição das parcelas e dos pontos amostrais em cada posição; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados.

Justifica-se este tipo de desenho experimental em virtude de minimizar a interrupção do trabalho na empresa. Nos tratamentos em que houve tráfego do *Forwarder*, este, primeiramente, foi completamente carregado fora da área experimental, e, então, trafegou sempre com mesma carga ($11,3 \text{ m}^3$ de madeira, $6,32 \text{ Mg}$) sobre mesma trilha de passagem dentro de cada parcela, numa velocidade média de 5 km h^{-1} , sendo que uma passada representou somente uma viagem de ida da máquina.

A coleta de dados iniciou em dezembro de 2011 e foi finalizada em janeiro de 2012. O solo, no momento dos ensaios de tráfego das máquinas, apresentava umidade gravimétrica de, aproximadamente, $0,065 \text{ kg kg}^{-1}$ na camada de 0 a 10 cm, $0,084 \text{ kg kg}^{-1}$ na camada de 10 a 20 cm, $0,073 \text{ kg kg}^{-1}$ na camada de 20 a 40 cm e $0,086 \text{ kg kg}^{-1}$ na camada de 40 a 60 cm de profundidade.

Para a determinação da densidade, distribuição de poros e condutividade hidráulica do

solo saturado, amostras de solo com estrutura preservada, em anéis de 5,7 cm de diâmetro por 4,0 cm de altura, foram coletadas nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, nas posições de trilha de tráfego dos rodados (RD) e nos entre rodados (ER). Em cada parcela, foram coletadas duas repetições para cada posição em cada bloco para cada camada, totalizando 360 amostras (2 repetições x 2 posições x 3 blocos x 4 camadas x 7 tratamentos de tráfego mais 2 repetições x 3 blocos x 4 camadas x 1 tratamento sem tráfego).

Nas mesmas camadas de profundidade, porém somente nas trilhas de tráfego das máquinas (RD), foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, para o ensaio de compressão uniaxial, sendo coletadas três repetições para cada tratamento em cada bloco em todas as camadas, totalizando 288 amostras (3 repetições x 3 blocos x 4 camadas x 8 tratamentos).

Ainda, foram coletados anéis com dimensões de 2,8 cm de altura e 10,0 cm de diâmetro para uso na determinação da resistência do solo ao cisalhamento. Entretanto, somente foi amostrada a posição de linha de tráfego das máquinas (RD) e nos tratamentos ST, H+1F, H+4F, H+16F. A amostragem compreendeu quatro repetições para cada tratamento em cada bloco em todas as camadas, totalizando 192 amostras (4 repetições x 3 blocos x 4 camadas x 4 tratamentos).

4.2.3 Determinações

4.2.3.1 Área de contato, pressão exercida pelas máquinas sobre o solo e camada de resíduos

A pressão que cada máquina estudada exerce sobre o solo foi calculada pela medição da área de contato do rodado com o solo. Para tal fim, os rodados das máquinas foram demarcados com auxílio de farinha de trigo (Figuras 64a e 64b) e, após a saída da máquina, foi colocada uma trena no sentido longitudinal para servir de escala de referência na tomada de uma foto digital (Figura 64c). O cálculo da área de contato foi realizado com auxílio de software específico.

A pressão estática exercida pelo rodado sobre a superfície do solo foi calculada com a equação desenvolvida por Wästerlund (1994):

$$P_c = \frac{W}{A} \cdot 9,807 \quad (11)$$

onde: P_c = pressão rodado-solo (kPa); W = massa da máquina sobre o rodado (kg); A = área de contato rodado solo (cm²).

Para o tráfego de *Harvester*, a área e pressão de contato foram determinadas somente após uma passada da máquina. Para o tráfego de *Forwarder*, a determinação foi realizada para os rodados dianteiros e traseiros, após uma passada e após 32 passadas da máquina, considerando uma distribuição do peso da máquina de 40 % para o eixo dianteiro e 60 % para o eixo traseiro, da mesma forma que consideraram Eliasson e Wästerlund (2007).



Figura 64 – Determinação de área de contato pneu-solo. Demarcação do rodado do *Harvester* (a) e do *Forwarder* (b); foto digital com trena como referência (c).

A camada de resíduo da colheita de madeira foi determinada por meio de amostragens com uma moldura quadrada de 0,25 m x 0,25 m, sendo distribuída ao acaso em dois pontos dentro de cada parcela em cada bloco (Figura 65). 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.



Figura 65 – Moldura quadrada utilizada para determinação da camada de resíduos.

4.2.3.2 Densidade do solo, distribuição de poros, condutividade hidráulica, curva de retenção de água e conteúdo de água disponível

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e pesadas, obtendo-se, posteriormente, as umidades nas tensões de equilíbrio de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), determinando-se a macroporosidade (Mac), a microporosidade (Mic), e a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), aqui considerada a umidade na tensão de 10 kPa. As umidades nas tensões de 33 e 100 kPa foram obtidas em câmaras de pressão de Richards (KLUTE, 1986). A umidade volumétrica das amostras foi obtida pela relação entre a quantidade de água retida em determinada tensão e o volume do cilindro de coleta.

A obtenção da umidade nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foi através de um psicrômetro de ponto de orvalho (DECAGON, 2000), sendo utilizadas amostras de solo com estrutura alterada para isso.

Em seguida, as amostras com estrutura preservada foram ressaturadas para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em laboratório, utilizando-se um permeâmetro de carga constante (LIBARDI, 2005) (Figura 66). Por fim, as amostras foram levadas à estufa por cerca de dois dias, obtendo-se a porosidade total (P_t) (EMBRAPA, 1997) e densidade do solo (D_s) (BLAKE; HARTGE, 1986).

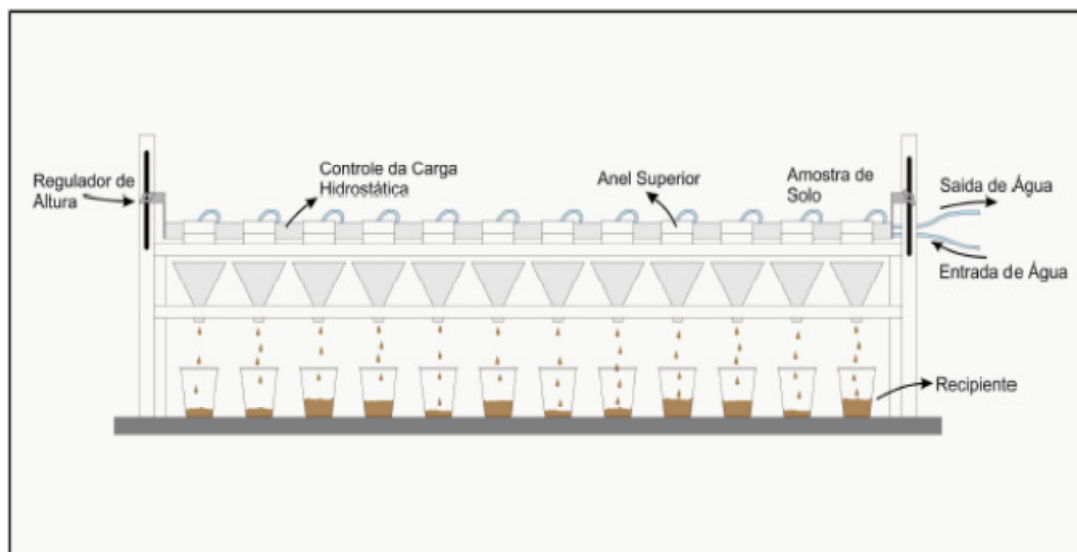


Figura 66 – Permeômetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado. Fonte: Abrão (2011).

O cálculo do conteúdo de água disponível (AD), o ajuste da curva de retenção de água (CRA) e a distribuição de tamanho de poros foram realizados conforme descrito no Estudo I (p. 32).

4.2.3.3 Permeabilidade do solo ao ar

Após o equilíbrio das amostras em cada tensão anteriormente mencionada, foi medido o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeômetro de fluxo constante de ar. O equipamento é composto por uma série de fluxímetros com diferentes vazões, por onde o ar flui antes de passar pelo solo (VOSSBRINK, 2004) (Figura 67).

O fluxo de ar foi aplicado à pressão constante de 0,1 kPa, baixa suficiente para evitar o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra foi medido por um manômetro de água. A condutividade do ar no solo (K_a) foi calculada usando-se a equação:

$$K_a = \rho \times g \left(\frac{\Delta v \times L}{\Delta t \times \Delta p \times A_m} \right) \quad (12)$$

onde: K_a = permeabilidade do solo ao ar (μm^2); ρ = densidade do ar (kg m^{-3}); g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); ΔV = variação de volume de ar (m^3) que passa pela amostra durante determinado intervalo de tempo (Δt , em segundos); l = comprimento da amostra de solo (m); Δp = pressão do ar aplicada (hPa); A_m = área da seção transversal da amostra (m^2).

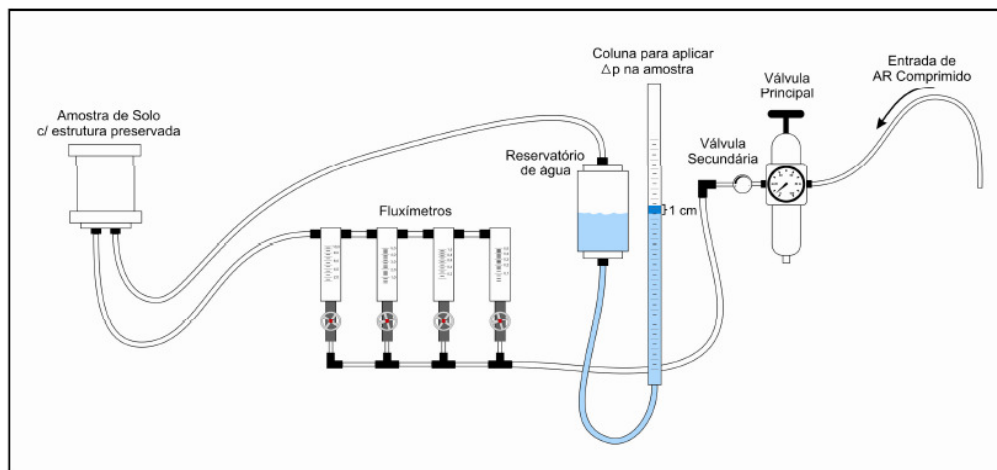


Figura 67 – Permeâmetro de fluxo constante de ar utilizado nas medições de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura de solo preservada. Fonte: Abrão (2011).

4.2.3.4 Compressibilidade

A curva de compressão do solo, os valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressão (IC) foram obtidos conforme descrito no Estudo I (p. 33). Porém, para o ensaio, as amostras foram separadas em três grupos correspondentes à diferentes condições de umidade, sendo o primeiro grupo correspondente à umidade do solo na condição de campo em que foram realizados os ensaios de tráfego das máquinas, e o segundo e terceiro grupos são correspondentes às umidades nas tensões de água de 10 e 100 kPa, respectivamente, que foram obtidas pelo equilíbrio das amostras utilizando coluna de areia e câmaras de Richards, respectivamente.

4.2.3.5 Grau de compactação

O grau de compactação do solo (GC) (HÅKANSSON, 1990) foi calculado pela seguinte equação:

$$GC = \frac{D_s}{D_{s_{Ref}}} \times 100 \quad (13)$$

onde: GC = grau de compactação (%); D_s = densidade atual do solo ($Mg\ m^{-3}$); e $D_{s_{Ref}}$ = densidade de referência do solo ($Mg\ m^{-3}$) obtido em laboratório.

Como densidade de referência do solo ($D_{s_{ref}}$) foram utilizados os valores de densidade obtidos após o ensaio de compressão uniaxial nas tensões normais de 400 kPa ($D_{s_{Ref400}}$), 800

kPa ($D_{S_{Ref800}}$) e 1600 kPa ($D_{S_{Ref1600}}$). Também foi utilizado como densidade de referência o valor de D_s obtido após ensaio de Proctor Normal ($D_{S_{MAX}}$).

4.2.3.6 Resistência do solo ao cisalhamento

A resistência do solo ao cisalhamento foi determinada com uso de uma prensa de cisalhamento direto e compressão uniaxial do solo, marca *Wazau* (Figura 68), a qual possui a característica de ser equipada com um tensiômetro, podendo ser realizadas leituras da tensão de água na amostra durante o ensaio. A velocidade de deslocamento horizontal empregada durante o teste foi de $0,33 \text{ mm min}^{-1}$, com deslocamento máximo de 20 mm. As amostras, primeiramente, foram saturadas por capilaridade e, então, submetidas à tensão de água de 10 kPa em coluna de areia. No ensaio, foram aplicadas as tensões normais de 50, 100, 200 e 400 kPa, sendo estas escolhidas com base nas cargas aplicadas pelas máquinas de colheita sobre o solo (LEBERT; HORN, 1991; SILVA et al., 2004; HORN et al., 2004).

Após a execução dos testes, plotaram-se os valores de tensão normal (σ) versus tensão cisalhante (τ), obtendo-se uma linha cuja inclinação representa o ângulo de atrito interno (ϕ) e o ponto de intersecção dessa linha com o eixo da ordenada definindo a coesão do solo (c).

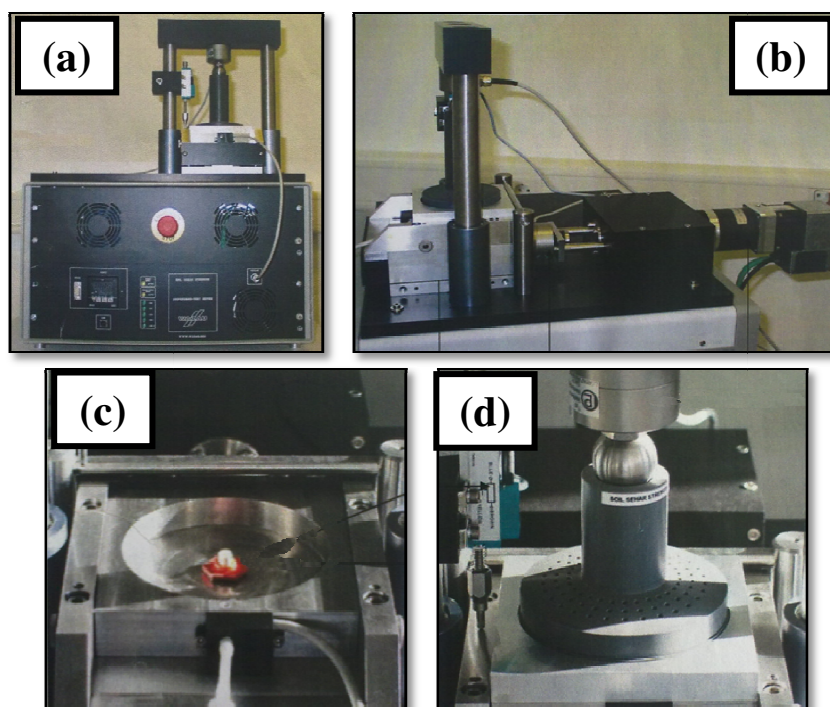


Figura 68 – Prensa de cisalhamento direto e compressão uniaxial do solo; (a) vista frontal e (b) lateral do equipamento; (c) área de teste onde a amostra é colocada para ensaio sobre o tensiômetro e; (d) vista do ensaio sendo realizado, com a amostra inserida na área de teste e tensão normal sendo aplicada.

4.2.3.7 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RPC) foi medida *in situ* com o uso de um penetrômetro eletrônico digital, marca *Rimik* e modelo CP20, equipado com uma ponta em forma de cone, com ângulo de vértice de 30° e base de 12,83 mm de diâmetro nominal, sendo as leituras realizadas a cada 1,5 cm até a profundidade de 60 cm. Embora tenham sido obtidos, a cada 1,5 cm de profundidade, os dados de RP foram agrupados em camadas, em intervalos de 10 cm até 60 cm de profundidade.

As leituras de RPC foram realizadas em três pontos nas trilhas de passagem dos rodados das máquinas (RD), transversalmente a 50 e 100 cm, e em três pontos entre os rodados (ER) (Figura 69), tendo sido o mesmo procedimento repetido em cada parcela e em cada bloco. Para o tratamento ST, em virtude da ausência de tráfego de máquinas, as leituras foram realizadas em 11 pontos equidistantes entre si, a cada 50 cm, com repetição de três vezes em cada parcela por bloco. Devido à dependência da RP em relação à umidade do solo (BUSSCHER, 1990; CORRECHEL et al., 1999; REICHERT et al., 2007), todas as medidas de resistência foram realizadas ao final de janeiro de 2012, após um período de chuva, quando a umidade do solo se encontrava próxima da capacidade de campo, conforme recomendado por Smith et al. (1997c) e Reichert et al. (2010), sendo que a umidade gravimétrica média do solo no momento das medições foi de 0,136 kg kg⁻¹ na camada de 0 a 10 cm; 0,146 kg kg⁻¹ na camada de 10 a 20 cm; 0,141 kg kg⁻¹ na camada de 20 a 40 cm; e 0,133 kg kg⁻¹ na camada de 40 a 60 cm de profundidade.

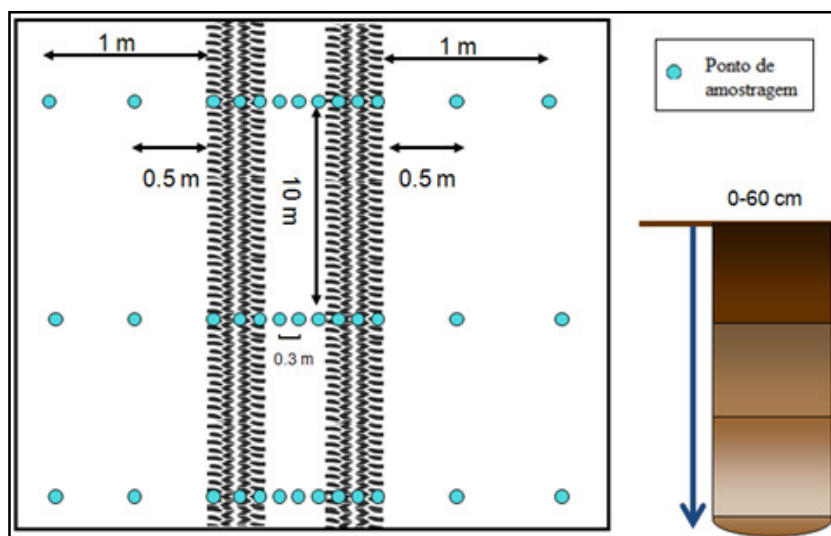


Figura 69 – Desenho do esquema das medições de resistência à penetração nas posições em relação à trilha de tráfego das máquinas de colheita da madeira.

4.2.4 Análises dos dados

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados. Os valores das variáveis avaliadas primeiramente 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. Ressalta-se que, para a permeabilidade do solo ao ar (K_a), em função de algumas amostras em determinadas tensões de água apresentarem valores extremamente altos ou iguais a zero, devido às limitações do equipamento empregado, foram utilizados os valores médios para contornar esse problema em relação às análises estatísticas, da mesma forma que asseveram Berisso et al. (2012).

Além das análises citadas, os dados de RPC também foram processados graficamente para elaboração de mapas de isolinhas, com auxílio do *software* GS+ 9,0 (ROBERTSON, 1998), utilizando o método de interpolação “distância inversa ponderada”.

Por fim, as relações entre as variáveis foram avaliadas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson (r), sendo ajustados, ocasionalmente, modelos de regressão linear múltipla por *Stepwise*, e dados *outliers* eliminados conforme os critérios de Tukey (1997), Hoaglin (1983) e Regazzi e Leite (1993).

4.3 Resultados e discussão

4.3.1. Área de contato, pressão das máquinas sobre o solo e camada de resíduos

O *Harvester* apresentou um valor de área de contato de $1,52 \text{ m}^2$, obviamente, devido à máquina ser equipada com rodados de esteiras. O *Forwarder* apresentou valores menores, uma vez que é equipado com pneus e, após uma passada sobre o solo, os valores de área de contato foram de $0,32 \text{ m}^2$ para os rodados dianteiros e $0,41 \text{ m}^2$ para os traseiros, enquanto que, para 32 passadas, os valores foram menores, de $0,15 \text{ m}^2$ para os rodados dianteiros e $0,16 \text{ m}^2$ para os traseiros (Tabela 16).

Esses resultados podem ser em função da área de contato ser diretamente relacionada às dimensões (largura, diâmetro) dos rodados, pressão de inflação dos pneus ou rigidez de esteiras, carga por eixo e por rodado e, principalmente, rigidez do solo (INNS; KILGOUR, 1978; O’SULLIVAN et al., 1999; KELLER; ARVIDSSON, 2004; LAMANDÉ; SCHJØNNING, 2011a,b,c). Esse último fator, provavelmente, foi o mais significativo nos resultados, uma vez que, inicialmente, o solo apresentava rigidez menor e, assim, com as

sucessivas passadas das máquinas, houve modificações estruturais no solo, devido à compactação, resultando em maior rigidez do solo e em menor área de contato.

Tabela 16 – Valores de área de contato e pressão exercida pelas máquinas sobre o solo.

Parâmetro	Máquina				
	<i>Harvester</i> (Peso operacional + peso equipamento = 23,3 Mg)	<i>Forwarder</i> (Peso operacional + carga = 25,4 Mg)			
		Rodados de pneus (pressão de inflação = 503 kPa)			
	Rodados de esteiras	1 passada		32 passadas	
Dianteiros		Traseiros	Dianteiros	Traseiros	
Área de contato (m ²)	1,519	0,322	0,412	0,154	0,164
Pressão exercida sobre o solo (kPa)	75,2	77,4	90,6	162,3	228,0

Portanto, como a pressão exercida sobre o solo é calculada por meio da carga sobre os rodados e área de contato, diferentes valores foram encontrados nas condições estudadas. O *Harvester* exerceu uma pressão sobre o solo de 75,2 kPa, enquanto o *Forwarder* apresentou valores de 77,4 e 90,6 kPa após uma passada e 162,3 e 228,0 kPa após 32 passadas para os rodados dianteiros e traseiros, respectivamente (Tabela 16). Salienta-se que os menores valores dos rodados dianteiros se deveram em função da distribuição do peso da máquina ter sido calculada com base em 40 % para os rodados dianteiros e 60 % para os traseiros.

Silva (2003b), estudando a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, encontrou valores menores de pressão sobre o solo para um *Harvester* equipado com esteiras com peso total de 22,3 Mg, sendo na ordem de 46,36 kPa. O mesmo autor também relata para um *Forwarder* com rodados de pneus e peso total (máquina mais carga) de 42,4 Mg valores maiores de pressão sobre o solo para os rodados dianteiros, em média 123 kPa, e valores de pressão próximos para os rodados traseiros, em torno de 101 kPa, isso considerando somente uma passada da máquina, uma vez que o autor não simulou diferentes passadas.

A importância da rigidez do solo em relação à pressão exercida é evidenciada por diversos autores. Söhne (1953), para modelar a distribuição de esforços no solo embaixo de uma roda de trator agrícola, propôs uma equação baseada em Boussinesq modificada utilizando diferentes valores para solos duros, firmes e soltos. Os valores foram obtidos empiricamente utilizando diferentes combinações de densidade do solo e umidade durante seus ensaios. O'Sullivan et al. (1999) também utilizaram a densidade do solo como parâmetro

de variação para modelar a distribuição de pressão sobre o solo resultante do tráfego de tratores agrícolas.

De acordo com Alakukku (1999) para solos muito duros ou secos, a distribuição das tensões verticais acontece de forma mais horizontal no perfil do solo, enquanto que, para solos menos densos e úmidos, as pressões verticais são transmitidas até maiores profundidades. Isso vem de encontro com o citado por Hamza e Anderson (2005) e Lamandé e Schjøning (2011a,b,c), os quais explicaram que o incremento da pressão de contato aumenta o risco de compactação na superfície do solo, mas que esse aumento terá pouca influência na compactação do solo nas camadas mais profundas. Porém, o efeito da repetição de cargas (passadas) é agravante, pois, embora seja a primeira carga a que mais compacta o solo, cargas repetidas têm efeitos notórios no processo de compactação. Em função disso, Hamza e Anderson (2005) concluíram que à medida que a densidade do solo diminui, a pressão de contato máxima permissível para tratores também deve diminuir para não gerar compactação do solo.

Além dos fatores citados, atenta-se ao fato de que a pressão exercida sobre o solo pelos rodados da máquina não apresenta uma distribuição padrão e uniforme devido à deformação do pneu, tipo das garras e dureza da carcaça dos rodados e, ainda, à velocidade do tráfego, tornando muito complexo o estudo da distribuição de pressões no solo (ALAKUKKU et al., 2003; REICHERT et al., 2010).

Um exemplo dessa complexidade é demonstrado por Eliasson (2005), que, trabalhando com o tráfego de um *Forwarder*, observou que a redução da pressão de inflação dos pneus de 600 para 300 kPa resultou em menor compactação do solo após uma passada da máquina, sobretudo até os 20 cm de profundidade. Entretanto, após quatro passadas não foram constatadas diferenças em função de diferentes pressões de inflação.

Outro fator associado à pressão no solo por máquinas de colheita da madeira é a camada de resíduos. Akay et al. (2007) reportaram diferentes valores estimados de pressão exercida sobre o solo para um *Forwarder* completamente carregado, em função de diferentes tamanhos de pneus e de condições do solo. Em condição de solo com camada de resíduos, a pressão média exercida pelos rodados foi de 113,5, 94,5 e 78,5 kPa, para tamanho de pneus de largura maior, média e menor, respectivamente, enquanto que para a condição de solo nu, a pressão média foi de 143,5, 131,5 e 125,5 kPa. Esse fato é associado em função dos resíduos da colheita da madeira contribuírem na distribuição das pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas sobre o solo, resultando em maior capacidade de suporte do solo, redução da formação de sulcos e, conseqüentemente, menor compactação (WRONSKI, 1990; SEIXAS et

al., 1998; AMPOORTER et al., 2007. ELIASSON; WÄSTERLUND, 2007; SILVA et al., 2007).

No presente estudo, o valor médio de massa seca da camada de resíduos na área do experimento foi de $5,62 (\pm 1,98) \text{ kg m}^{-2}$, não diferindo muito entre os blocos (Tabela 17).

Tabela 17 – Valores médios de quantidade de resíduos (\pm desvio padrão) por bloco na área do experimento.

Camada de resíduos (kg m^{-2})			
Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Média
6,04 ($\pm 2,20$)	5,39 ($\pm 1,18$)	5,42 ($\pm 2,59$)	5,62 ($\pm 1,98$)

Embora o sucessivo tráfego das máquinas tenha deixado visíveis distúrbios no solo, a formação de sulcos foi muito pequena, portanto, não havendo viabilidade em sua determinação, conforme ilustra a Figura 70.



Figura 70 – Aspecto do solo após as sucessivas passadas das máquinas.

4.3.2. Densidade do solo e distribuição do tamanho de poros

O tráfego das máquinas causou alterações na densidade e na distribuição de poros do solo em praticamente todos os níveis de tráfego simulados e posições avaliadas, principalmente na linha de rodados (RD), nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade (Tabelas 18, 19, 20 e 21).

Tabela 18 – Valores médios de densidade e porosidade total (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Densidade do solo (Mg m^{-3})				Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	1,43 d ($\pm 0,14$)	1,47 c ($\pm 0,14$)	1,43 c ($\pm 0,05$)	1,42 d ($\pm 0,04$)	0,388 a ($\pm 0,022$)	0,405 a ($\pm 0,020$)	0,421 a ($\pm 0,017$)	0,464 ab ($\pm 0,004$)
H	RD	1,53 abcd ($\pm 0,09$)	1,59 ab ($\pm 0,11$)	1,45 bc ($\pm 0,06$)	1,47 abcd ($\pm 0,08$)	0,350 abc ($\pm 0,024$)	0,346 bcd ($\pm 0,032$)	0,388 ab ($\pm 0,029$)	0,437 abcd ($\pm 0,036$)
	ER	1,55 abcd ($\pm 0,06$)	1,58 ab ($\pm 0,08$)	1,48 abc ($\pm 0,08$)	1,55 ab ($\pm 0,06$)	0,330 bc ($\pm 0,034$)	0,330 bcd ($\pm 0,040$)	0,398 ab ($\pm 0,068$)	0,410 cde ($\pm 0,022$)
H+1F	RD	1,56 abc ($\pm 0,07$)	1,59 ab ($\pm 0,09$)	1,54 a ($\pm 0,09$)	1,49 abcd ($\pm 0,05$)	0,351 abc ($\pm 0,043$)	0,330 bcd ($\pm 0,039$)	0,380 abc ($\pm 0,028$)	0,447 abcd ($\pm 0,027$)
	ER	1,56 abc ($\pm 0,06$)	1,57 abc ($\pm 0,06$)	1,53 ab ($\pm 0,06$)	1,50 abcd ($\pm 0,10$)	0,318 bc ($\pm 0,008$)	0,340 bcd ($\pm 0,044$)	0,367 bc ($\pm 0,035$)	0,439 abcd ($\pm 0,054$)
H+2F	RD	1,53 abcd ($\pm 0,06$)	1,53 abc ($\pm 0,03$)	1,52 ab ($\pm 0,03$)	1,50 abcd ($\pm 0,08$)	0,333 bc ($\pm 0,035$)	0,355 bcd ($\pm 0,031$)	0,379 abc ($\pm 0,026$)	0,417 bcde ($\pm 0,016$)
	ER	1,49 bcd ($\pm 0,07$)	1,52 abc ($\pm 0,06$)	1,53 ab ($\pm 0,04$)	1,54 abc ($\pm 0,08$)	0,305 c ($\pm 0,030$)	0,334 bcd ($\pm 0,028$)	0,387 ab ($\pm 0,017$)	0,426 abcd ($\pm 0,019$)
H+4F	RD	1,59 ab ($\pm 0,06$)	1,63 a ($\pm 0,04$)	1,53 ab ($\pm 0,04$)	1,43 cd ($\pm 0,06$)	0,342 abc ($\pm 0,019$)	0,332 bcd ($\pm 0,016$)	0,384 ab ($\pm 0,048$)	0,472 a ($\pm 0,023$)
	ER	1,55 abcd ($\pm 0,07$)	1,60 ab ($\pm 0,04$)	1,53 ab ($\pm 0,05$)	1,41 d ($\pm 0,04$)	0,335 bc ($\pm 0,038$)	0,345 bcd ($\pm 0,026$)	0,380 abc ($\pm 0,027$)	0,457 abc ($\pm 0,011$)
H+8F	RD	1,65 a ($\pm 0,09$)	1,54 abc ($\pm 0,03$)	1,51 abc ($\pm 0,05$)	1,53 abc ($\pm 0,07$)	0,326 bc ($\pm 0,030$)	0,363 abc ($\pm 0,027$)	0,387 ab ($\pm 0,017$)	0,445 abcd ($\pm 0,050$)
	ER	1,55 abcd ($\pm 0,05$)	1,50 bc ($\pm 0,08$)	1,51 abc ($\pm 0,03$)	1,55 ab ($\pm 0,08$)	0,353 abc ($\pm 0,026$)	0,375 ab ($\pm 0,043$)	0,388 ab ($\pm 0,021$)	0,422 abcde ($\pm 0,031$)
H+16F	RD	1,60 ab ($\pm 0,06$)	1,58 abc ($\pm 0,04$)	1,54 a ($\pm 0,08$)	1,56 a ($\pm 0,10$)	0,324 bc ($\pm 0,027$)	0,309 d ($\pm 0,008$)	0,365 bc ($\pm 0,040$)	0,370 e ($\pm 0,056$)
	ER	1,45 cd ($\pm 0,06$)	1,56 abc ($\pm 0,04$)	1,49 abc ($\pm 0,04$)	1,44 bcd ($\pm 0,03$)	0,369 ab ($\pm 0,034$)	0,314 cd ($\pm 0,026$)	0,357 bc ($\pm 0,032$)	0,401 de ($\pm 0,010$)
H+32F	RD	1,58 ab ($\pm 0,05$)	1,62 ab ($\pm 0,06$)	1,51 ab ($\pm 0,03$)	1,52 abcd ($\pm 0,08$)	0,324 bc ($\pm 0,019$)	0,320 cd ($\pm 0,027$)	0,338 c ($\pm 0,021$)	0,429 abcd ($\pm 0,051$)
	ER	1,54 abcd ($\pm 0,05$)	1,59 ab ($\pm 0,06$)	1,49 abc ($\pm 0,02$)	1,50 abcd ($\pm 0,08$)	0,338 abc ($\pm 0,028$)	0,318 cd ($\pm 0,015$)	0,385 ab ($\pm 0,032$)	0,432 abcd ($\pm 0,034$)
Valor F		4,42**	3,80**	4,05**	4,95**	3,99**	6,69**	4,76**	6,07**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; **significativo a 1%; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Em relação à Ds e Pt, os resultados não foram claramente distintos em função do incremento do número de passadas das máquinas (Tabela 18). Considerando a posição RD, na camada de 0 a 10 cm, os tratamentos com maior número de passadas foram os que causaram as maiores alterações, sendo que, após uma passada do *Harvester* mais oito passadas dos *Forwarder* (H+8F), houve incremento da Ds na ordem de 15,3 % e redução da Pt em 16,1 %. Contudo, já ocorreu diferença significativa em relação à condição ST, no tratamento H+1F para a Ds e H+2F para a Pt. Na camada de 10 a 20 cm, foi necessário somente uma passada do *Harvester* mais quatro passadas do *Forwarder* (H+4F) para resultar em 10,8 % de incremento de Ds e redução de 18 % de Pt, havendo diferença significativa a partir de uma única passada do *Harvester* (H). Na camada de 20 a 40 cm, bem como na camada mais profunda (40 a 60 cm), foi o tratamento H+16F que gerou o incremento de Ds mais acentuado (7,4 e 10,2 %, respectivamente) e maior redução da Pt (13,2 e 20,2 %, respectivamente). Alterações físicas em camadas mais profundas de solo também são relatadas por Lopes et al. (2006), que verificaram aumento na densidade de um solo de textura argilosa até 50 cm de profundidade, ocasionada por passadas de um *Track Skidder* e de um *Clambunk Skidder* durante a operação de arraste das árvores.

Na posição entre rodados (ER), a superfície do solo (0 a 10 cm) foi mais afetada em termos de Ds pela condição H+1F que resultou em aumento de 9,3 %, enquanto, a Pt foi mais reduzida após H+2F em 21,6 %. Nas camadas intermediárias (10 a 40 cm de profundidade), o tratamento H+4F foi o mais impactante sobre a Ds, no entanto, o tratamento H+16F foi o que mais resultou em redução da Pt. Na camada mais profunda, somente os tratamentos H, H+2F e H+8F resultaram em diferença significativa com a situação ST considerando a Ds. A Pt foi reduzida significativamente pelos tratamentos H e H+16F.

Devido a esses resultados, fica evidente que grande parte do aumento da densidade e diminuição da porosidade total do solo já ocorreu durante as primeiras passadas das máquinas de colheita da madeira, pois bastou uma passada de ambas as máquinas (H+1F) para afetar significativamente a Ds até 40 cm de profundidade, e uma do *Harvester* mais duas do *Forwarder* (H+2F) para afetar significativamente a Pt até 20 cm de profundidade, considerando a trilha dos rodados (RD). Brais e Camiré (1998) constataram que, em solos de textura grosseira, 50 % do impacto total causado por operações de um *Skidder*, ocorreram após três passadas da máquina. 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.

Também pode-se verificar que as maiores alterações ocorreram nas camadas superficiais. Além disso, constatou-se que a ação do tráfego foi capaz de afetar essas propriedades em áreas além das trilhas de rodados das máquinas, em semelhança ao relatado nos trabalhos de Brais e Camiré (1998), Ampoorter et al. (2007) e Labelle e Jaeger (2011), sendo esses dois últimos trabalhos realizados com máquinas e solos de textura semelhantes aos do presente estudo.

O efeito do tráfego na compactação pode ser atribuído ao movimento lateral do solo abaixo da zona de compressão máxima, que está associada ao peso da máquina, bem como a uma pressão horizontal exercida no solo, ocasionada pelas passadas dos rodados das máquinas, resultando em tensões cisalhantes (WRONSKI, 1984; VOSSBRINK; HORN, 2004). Deve-se destacar que os efeitos das pressões aplicadas sobre a superfície do solo são distribuídos ao longo do perfil, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, conforme as características físicas do solo (REICHERT et al., 2010).

A densidade é considerada um indicador adequado da qualidade estrutural do solo (REICHERT et al., 2009), uma vez que se apresenta relacionada às outras propriedades físicas do solo, tendo grande interação com o conteúdo de água, afetando as outras propriedades conforme forem as condições de umidade, assim podendo gerar alta resistência mecânica à penetração e baixas condições de aeração (LETEY, 1985). Alta resistência do solo à penetração (≥ 2 ou 3 MPa) (GREACEN; SANDS, 1980; WHALLEY et al., 1995; ZOU et al., 2000), pobre aeração (porosidade de aeração ≤ 10 %) (ERICKSON, 1982), em conjunto com alta densidade do solo, são os fatores primários para a limitação do crescimento radicular, sendo esta a base do conceito de intervalo hídrico ótimo (IHO).

Nas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm), os valores de D_s encontrados nos resultados, muitas vezes, ficaram próximos ou excederam o valor de $D_{s_c IHO_{RP2MPa}}$, que foi de $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$ para ambas as camadas (Tabela 4, p. 47). Já os valores de $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$ de $1,67$ e $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$ para as respectivas camadas (Tabela 4, p. 47), em nenhuma situação foram excedidos, ficando próximos na camada de 0 a 10 cm somente na posição RD com o tratamento H+8F e, também, na camada de 10 a 20 cm de profundidade, com os tratamentos de H+4F e H+32F, o que, potencialmente, representa que esse número de passadas de máquinas florestais pode compactar o solo tornando-o fisicamente prejudicial ao crescimento radicular de plantas nessas camadas. Nas camadas mais profundas do solo, tanto a $D_{s_c IHO_{RP2MPa}}$ como a $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$ não foram ultrapassadas, demonstrando, outra vez, que o impacto foi maior nas camadas mais superficiais, pois, como já citado, isso pode ser atribuído em função da pressão aplicada no solo se dissipar em profundidade, impactando mais a

superfície do perfil do solo, sendo o impacto agravado devido à repetição de passadas (HAMZA; ANDERSON, 2005; LAMANDÉ; SCHJØNNING, 2011a,b,c). Além disso, como o solo, no momento do tráfego, encontrava-se em condição de umidade próximo do ponto de murcha permanente ($0,074 \text{ kg kg}^{-1}$), ou seja, seco, as tensões verticais podem ter sido dissipadas mais horizontalmente no perfil (ALAKUKKU, 1999; REICHERT et al., 2010).

Somente houve uma ocasião que resultou em aumento da densidade do solo acima de 15 % em relação à condição inicial (ST), a qual aconteceu na camada de 0 a 10 cm com o tratamento H+8F, sendo este o limite sugerido por Geist et al. (1989) e Lacey e Ryan (2000). Já o valor de D_s crítica de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, sugerido por Jones (1983) para solos de textura arenosa, em nenhuma situação foi excedido. Embora esses limites de densidade tenham sido sugeridos pelos autores para outras condições, os mesmos servem para efeito de comparação, pois pequenas alterações na D_s , segundo Oliveira et al. (2001), acarretam em maiores consequências, como redução da porosidade e do movimento de água no solo, o que será discutido em seguida.

Na camada de 0 a 10 cm, nenhum tratamento de tráfego diminuiu significativamente o volume de macroporos (Mac), enquanto que uma passada do *Harvester* (H) já foi suficiente para alterar significativamente a microporosidade (Mic) dessa camada (Tabela 19). Na camada seguinte (10 a 20 cm), diferenças significativas na Mac ocorreram a partir de H+1F, enquanto que, para a Mic, diferenças significativas foram verificadas na posição RD com H+8F e, na posição ER, com H+2F e H+16F. Nas camadas mais profundas, apenas a situação de maior intensidade de tráfego (H+32F) na posição RD resultou em redução significativa da Mac, já a Mic foi reduzida significativamente na posição RD, a partir de H+1F e, na posição ER, com H+2F para a camada de 20 a 40 cm, sendo este também o nível de tráfego em que já houve efeitos significativos na Mic na camada de 40 a 60 cm.

Para o adequado crescimento de plantas, a macroporosidade deve ser, no mínimo, de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (VOMOCIL; FLOCKER, 1961; GUPTA; ALLMARAS, 1987; DREWRY et al., 2008), sendo este limite ultrapassado em decorrência do tráfego, principalmente na camada de 10 a 20 cm.

Tabela 19 – Valores médios de macro e microporosidade (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Macroporosidade ($> 50\mu\text{m}$; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				Microporosidade ($< 50\mu\text{m}$; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	0,126 bc ($\pm 0,031$)	0,165 a ($\pm 0,082$)	0,153 abc ($\pm 0,025$)	0,180 cd ($\pm 0,008$)	0,263 a ($\pm 0,015$)	0,240 abc ($\pm 0,064$)	0,268 a ($\pm 0,010$)	0,284 ab ($\pm 0,011$)
H	RD	0,148 ab ($\pm 0,029$)	0,123 ab ($\pm 0,036$)	0,139 bcd ($\pm 0,020$)	0,189 bcd ($\pm 0,050$)	0,203 bc ($\pm 0,018$)	0,224 abc ($\pm 0,009$)	0,249 ab ($\pm 0,014$)	0,248 abcd ($\pm 0,016$)
	ER	0,118 bc ($\pm 0,027$)	0,112 ab ($\pm 0,042$)	0,157 abc ($\pm 0,032$)	0,174 cde ($\pm 0,019$)	0,211 bc ($\pm 0,016$)	0,218 abc ($\pm 0,012$)	0,241 ab ($\pm 0,037$)	0,235 bcd ($\pm 0,003$)
H+1F	RD	0,124 bc ($\pm 0,058$)	0,094 b ($\pm 0,042$)	0,145 abcd ($\pm 0,025$)	0,209 abc ($\pm 0,036$)	0,227 abc ($\pm 0,025$)	0,236 abc ($\pm 0,009$)	0,235 b ($\pm 0,011$)	0,238 bcd ($\pm 0,031$)
	ER	0,096 c ($\pm 0,019$)	0,094 b ($\pm 0,044$)	0,123 cd ($\pm 0,027$)	0,192 bcd ($\pm 0,063$)	0,222 abc ($\pm 0,012$)	0,246 ab ($\pm 0,011$)	0,244 ab ($\pm 0,020$)	0,247 abcd ($\pm 0,023$)
H+2F	RD	0,121 bc ($\pm 0,019$)	0,134 ab ($\pm 0,031$)	0,176 ab ($\pm 0,034$)	0,190 bcd ($\pm 0,019$)	0,211 bc ($\pm 0,048$)	0,221 abc ($\pm 0,016$)	0,203 c ($\pm 0,015$)	0,227 d ($\pm 0,021$)
	ER	0,110 bc ($\pm 0,031$)	0,129 ab ($\pm 0,032$)	0,180 a ($\pm 0,015$)	0,215 abc ($\pm 0,023$)	0,194 bc ($\pm 0,006$)	0,205 c ($\pm 0,010$)	0,207 c ($\pm 0,016$)	0,212 d ($\pm 0,005$)
H+4F	RD	0,104 bc ($\pm 0,033$)	0,079 b ($\pm 0,044$)	0,133 cd ($\pm 0,059$)	0,234 a ($\pm 0,026$)	0,238 ab ($\pm 0,026$)	0,253 a ($\pm 0,050$)	0,252 ab ($\pm 0,013$)	0,238 bcd ($\pm 0,014$)
	ER	0,122 bc ($\pm 0,035$)	0,123 ab ($\pm 0,026$)	0,134 cd ($\pm 0,024$)	0,227 ab ($\pm 0,014$)	0,212 bc ($\pm 0,016$)	0,223 abc ($\pm 0,017$)	0,246 ab ($\pm 0,021$)	0,230 d ($\pm 0,020$)
H+8F	RD	0,097 c ($\pm 0,053$)	0,155 a ($\pm 0,029$)	0,152 abc ($\pm 0,031$)	0,201 abc ($\pm 0,055$)	0,229 abc ($\pm 0,030$)	0,208 bc ($\pm 0,013$)	0,235 b ($\pm 0,023$)	0,244 abcd ($\pm 0,017$)
	ER	0,147 ab ($\pm 0,021$)	0,161 a ($\pm 0,025$)	0,146 abcd ($\pm 0,011$)	0,190 bcd ($\pm 0,025$)	0,206 bc ($\pm 0,007$)	0,215 abc ($\pm 0,027$)	0,242 ab ($\pm 0,012$)	0,232 cd ($\pm 0,013$)
H+16F	RD	0,115 bc ($\pm 0,027$)	0,093 b ($\pm 0,021$)	0,129 cd ($\pm 0,040$)	0,153 de ($\pm 0,035$)	0,209 bc ($\pm 0,009$)	0,216 abc ($\pm 0,018$)	0,237 b ($\pm 0,009$)	0,217 d ($\pm 0,058$)
	ER	0,176 a ($\pm 0,027$)	0,110 ab ($\pm 0,029$)	0,131 cd ($\pm 0,034$)	0,177 cde ($\pm 0,015$)	0,193 c ($\pm 0,015$)	0,204 c ($\pm 0,009$)	0,225 bc ($\pm 0,044$)	0,223 d ($\pm 0,006$)
H+32F	RD	0,110 bc ($\pm 0,018$)	0,083 b ($\pm 0,020$)	0,111 d ($\pm 0,014$)	0,135 e ($\pm 0,030$)	0,214 bc ($\pm 0,019$)	0,236 abc ($\pm 0,031$)	0,227 bc ($\pm 0,013$)	0,294 a ($\pm 0,075$)
	ER	0,113 bc ($\pm 0,020$)	0,088 b ($\pm 0,013$)	0,139 bcd ($\pm 0,020$)	0,150 de ($\pm 0,015$)	0,225 abc ($\pm 0,027$)	0,229 abc ($\pm 0,007$)	0,246 ab ($\pm 0,020$)	0,282 abc ($\pm 0,042$)
	Valor F	4,52**	6,11**	5,43**	11,12**	4,16**	3,57**	9,16**	5,99**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; **significativo a 1%; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Os poros com diâmetro entre 50 a 30 μm não foram significativamente afetados pelo tráfego das máquinas. Já na camada de 10 a 20 cm, houve redução significativa de poros de 30 a 10 μm nos maiores níveis de tráfego, a partir de uma passada do *Harvester* mais oito passadas do *Forwarder* na posição ER, enquanto nas camadas mais profundas poucas passadas já resultaram em redução significativa (Tabela 20).

Tabela 20 – Valores médios de poros de diâmetro de 50 a 30 μm e 30 a 10 μm (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Diâmetro dos poros							
		50 a 30 μm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				30 a 10 μm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	0,016 ($\pm 0,011$)	0,013 ($\pm 0,007$)	0,013 a ($\pm 0,004$)	0,014 abcd ($\pm 0,002$)	0,037 ($\pm 0,014$)	0,052 a ($\pm 0,018$)	0,096 a ($\pm 0,077$)	0,049 ab ($\pm 0,008$)
H	RD	0,012 ($\pm 0,011$)	0,013 ($\pm 0,009$)	0,015 a ($\pm 0,007$)	0,015 abcd ($\pm 0,003$)	0,029 ($\pm 0,010$)	0,039 ab ($\pm 0,029$)	0,032 b ($\pm 0,016$)	0,031 bc ($\pm 0,020$)
	ER	0,019 ($\pm 0,009$)	0,014 ($\pm 0,008$)	0,025 a ($\pm 0,012$)	0,016 abc ($\pm 0,005$)	0,040 ($\pm 0,020$)	0,034 ab ($\pm 0,014$)	0,049 ab ($\pm 0,045$)	0,034 abc ($\pm 0,005$)
H+1F	RD	0,021 ($\pm 0,004$)	0,016 ($\pm 0,004$)	0,016 a ($\pm 0,005$)	0,015 abcd ($\pm 0,011$)	0,027 ($\pm 0,012$)	0,037 ab ($\pm 0,009$)	0,035 b ($\pm 0,016$)	0,040 abc ($\pm 0,005$)
	ER	0,016 ($\pm 0,007$)	0,020 ($\pm 0,005$)	0,020 a ($\pm 0,005$)	0,011 bcd ($\pm 0,005$)	0,035 ($\pm 0,029$)	0,032 ab ($\pm 0,014$)	0,033 b ($\pm 0,017$)	0,047 ab ($\pm 0,048$)
H+2F	RD	0,023 ($\pm 0,026$)	0,016 ($\pm 0,005$)	0,015 a ($\pm 0,006$)	0,007 d ($\pm 0,012$)	0,030 ($\pm 0,018$)	0,025 ab ($\pm 0,013$)	0,030 b ($\pm 0,016$)	0,032 bc ($\pm 0,010$)
	ER	0,014 ($\pm 0,005$)	0,012 ($\pm 0,005$)	0,014 a ($\pm 0,005$)	0,007 cd ($\pm 0,004$)	0,013 ($\pm 0,004$)	0,023 ab ($\pm 0,013$)	0,032 b ($\pm 0,022$)	0,053 a ($\pm 0,020$)
H+4F	RD	0,015 ($\pm 0,010$)	0,024 ($\pm 0,039$)	0,018 a ($\pm 0,007$)	0,020 a ($\pm 0,001$)	0,032 ($\pm 0,010$)	0,032 ab ($\pm 0,016$)	0,046 ab ($\pm 0,016$)	0,043 abc ($\pm 0,012$)
	ER	0,010 ($\pm 0,010$)	0,010 ($\pm 0,007$)	0,015 a ($\pm 0,006$)	0,013 abcd ($\pm 0,001$)	0,036 ($\pm 0,018$)	0,040 ab ($\pm 0,008$)	0,050 ab ($\pm 0,023$)	0,034 abc ($\pm 0,005$)
H+8F	RD	0,011 ($\pm 0,010$)	0,011 ($\pm 0,009$)	0,012 a ($\pm 0,004$)	0,021 a ($\pm 0,006$)	0,033 ($\pm 0,008$)	0,029 ab ($\pm 0,014$)	0,031 b ($\pm 0,011$)	0,034 abc ($\pm 0,022$)
	ER	0,022 ($\pm 0,004$)	0,020 ($\pm 0,004$)	0,023 a ($\pm 0,006$)	0,018 ab ($\pm 0,003$)	0,026 ($\pm 0,026$)	0,019 b ($\pm 0,005$)	0,036 b ($\pm 0,031$)	0,030 bc ($\pm 0,024$)
H+16F	RD	0,016 ($\pm 0,009$)	0,016 ($\pm 0,004$)	0,017 a ($\pm 0,003$)	0,013 abcd ($\pm 0,002$)	0,035 ($\pm 0,016$)	0,018 b ($\pm 0,012$)	0,031 b ($\pm 0,012$)	0,037 abc ($\pm 0,015$)
	ER	0,017 ($\pm 0,003$)	0,017 ($\pm 0,002$)	0,024 a ($\pm 0,015$)	0,017 ab ($\pm 0,003$)	0,028 ($\pm 0,017$)	0,026 ab ($\pm 0,009$)	0,021 b ($\pm 0,012$)	0,039 abc ($\pm 0,019$)
H+32F	RD	0,023 ($\pm 0,002$)	0,016 ($\pm 0,007$)	0,016 a ($\pm 0,003$)	0,016 abc ($\pm 0,004$)	0,043 ($\pm 0,056$)	0,022 b ($\pm 0,010$)	0,021 b ($\pm 0,008$)	0,023 c ($\pm 0,013$)
	ER	0,022 ($\pm 0,013$)	0,020 ($\pm 0,003$)	0,021 a ($\pm 0,006$)	0,018 ab ($\pm 0,001$)	0,028 ($\pm 0,026$)	0,026 ab ($\pm 0,023$)	0,032 b ($\pm 0,012$)	0,022 c ($\pm 0,013$)
	Valor F	1,26 ns	0,76 ns	2,44*	5,10**	0,65 ns	2,21*	2,96**	4,53**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Os poros de diâmetro de 10 a 3 μm e menores que 3 μm (Tabela 21), em geral, tiveram tendência de aumento com a submissão do solo ao tráfego, exceto na camada de 0 a 10 cm. Porém, esse aumento com a compactação pode levar à redução dos fluxos de água e ar do solo (STRECK, 2007; REICHERT et al., 2007).

Tabela 21 – Valores médios de poros de diâmetro de 10 a 3 μm e menor que 3 μm (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Diâmetro dos poros							
		10 a 3 μm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				< 3 μm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	
ST	-	0,013 a ($\pm 0,010$)	0,016 ab ($\pm 0,008$)	0,018 ab ($\pm 0,005$)	0,015 bcd ($\pm 0,008$)	0,196 a ($\pm 0,021$)	0,159 ab ($\pm 0,057$)	0,140 a ($\pm 0,080$)	0,206 abc ($\pm 0,009$)
H	RD	0,026 a ($\pm 0,015$)	0,013 ab ($\pm 0,011$)	0,017 ab ($\pm 0,012$)	0,017 bcd ($\pm 0,015$)	0,136 bc ($\pm 0,028$)	0,158 ab ($\pm 0,007$)	0,185 a ($\pm 0,023$)	0,184 abcd ($\pm 0,014$)
	ER	0,013 a ($\pm 0,009$)	0,014 ab ($\pm 0,010$)	0,020 ab ($\pm 0,026$)	0,012 cd ($\pm 0,004$)	0,140 bc ($\pm 0,015$)	0,156 ab ($\pm 0,027$)	0,148 a ($\pm 0,020$)	0,172 bcd ($\pm 0,004$)
H+1F	RD	0,027 a ($\pm 0,009$)	0,028 ab ($\pm 0,016$)	0,027 ab ($\pm 0,013$)	0,024 abcd ($\pm 0,009$)	0,152 bc ($\pm 0,015$)	0,155 ab ($\pm 0,005$)	0,157 a ($\pm 0,012$)	0,159 cd ($\pm 0,026$)
	ER	0,028 a ($\pm 0,022$)	0,033 ab ($\pm 0,017$)	0,033 a ($\pm 0,017$)	0,027 abc ($\pm 0,022$)	0,143 bc ($\pm 0,019$)	0,162 ab ($\pm 0,008$)	0,158 a ($\pm 0,023$)	0,162 cd ($\pm 0,046$)
H+2F	RD	0,028 a ($\pm 0,014$)	0,031 ab ($\pm 0,016$)	0,024 ab ($\pm 0,016$)	0,020 abcd ($\pm 0,009$)	0,131 c ($\pm 0,034$)	0,150 ab ($\pm 0,006$)	0,134 a ($\pm 0,012$)	0,168 bcd ($\pm 0,016$)
	ER	0,032 a ($\pm 0,004$)	0,026 ab ($\pm 0,014$)	0,021 ab ($\pm 0,014$)	0,015 bcd ($\pm 0,011$)	0,136 bc ($\pm 0,009$)	0,143 ab ($\pm 0,018$)	0,141 a ($\pm 0,009$)	0,136 d ($\pm 0,019$)
H+4F	RD	0,013 a ($\pm 0,010$)	0,021 ab ($\pm 0,020$)	0,011 b ($\pm 0,004$)	0,014 bcd ($\pm 0,008$)	0,178 ab ($\pm 0,014$)	0,176 a ($\pm 0,007$)	0,177 a ($\pm 0,020$)	0,161 cd ($\pm 0,018$)
	ER	0,009 a ($\pm 0,006$)	0,006 b ($\pm 0,004$)	0,010 b ($\pm 0,006$)	0,012 d ($\pm 0,005$)	0,156 abc ($\pm 0,024$)	0,167 ab ($\pm 0,022$)	0,172 a ($\pm 0,019$)	0,171 bcd ($\pm 0,021$)
H+8F	RD	0,021 a ($\pm 0,015$)	0,007 ab ($\pm 0,004$)	0,011 b ($\pm 0,006$)	0,015 bcd ($\pm 0,007$)	0,164 abc ($\pm 0,013$)	0,161 ab ($\pm 0,004$)	0,182 a ($\pm 0,028$)	0,175 bcd ($\pm 0,033$)
	ER	0,020 a ($\pm 0,012$)	0,025 ab ($\pm 0,011$)	0,017 ab ($\pm 0,015$)	0,033 a ($\pm 0,018$)	0,138 bc ($\pm 0,018$)	0,151 ab ($\pm 0,014$)	0,165 a ($\pm 0,021$)	0,151 d ($\pm 0,045$)
H+16F	RD	0,023 a ($\pm 0,018$)	0,034 a ($\pm 0,016$)	0,020 ab ($\pm 0,014$)	0,018 abcd ($\pm 0,011$)	0,135 bc ($\pm 0,021$)	0,148 ab ($\pm 0,003$)	0,169 a ($\pm 0,007$)	0,149 d ($\pm 0,058$)
	ER	0,024 a ($\pm 0,016$)	0,025 ab ($\pm 0,009$)	0,025 ab ($\pm 0,018$)	0,028 ab ($\pm 0,017$)	0,124 c ($\pm 0,011$)	0,136 b ($\pm 0,013$)	0,155 a ($\pm 0,038$)	0,139 d ($\pm 0,006$)
H+32F	RD	0,025 a ($\pm 0,011$)	0,031 ab ($\pm 0,011$)	0,027 ab ($\pm 0,005$)	0,024 abcd ($\pm 0,010$)	0,123 c ($\pm 0,055$)	0,167 ab ($\pm 0,003$)	0,163 a ($\pm 0,010$)	0,231 a ($\pm 0,084$)
	ER	0,019 a ($\pm 0,013$)	0,022 ab ($\pm 0,010$)	0,016 ab ($\pm 0,010$)	0,027 abc ($\pm 0,010$)	0,156 abc ($\pm 0,018$)	0,161 ab ($\pm 0,020$)	0,177 a ($\pm 0,017$)	0,214 ab ($\pm 0,049$)
<i>Valor F</i>		1,94*	2,83**	2,47*	5,00**	5,45**	2,05**	2,23*	7,12**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

A densidade e a porosidade são propriedades relacionadas com alterações no volume do solo, por isso, são altamente relacionadas com a compactação do solo (REICHERT et al., 2007), portanto, tendem a apresentar correlação, como pode ser verificado na Tabela 22.

A densidade apresentou relação negativa com a Pt, Mac e até Mic, uma vez que o aumento da densidade significa também aumento do número de partículas por unidade de volume, o que foi relatado em semelhança por Cechin (2007), que estudou a compactação de

solos pelo tráfego de um sistema de colheita de Árvores Inteiras composto por *Feller* e *Skidder*. Ainda, a Ds apresentou relação negativa com poros de tamanho de 30 a 10 μm e relação positiva com poros de 10 a 3 μm , significando que, com a compactação, houve a compressão até de poros de tamanho intermediário, e, assim, aumentando o volume de poros pequenos, embora os microporos sejam mais relacionados às características texturais do que estruturais do solo (HILLEL, 1998) (Tabela 22).

Tabela 22 – Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), poros com diâmetro entre a 50 a 30 μm ($P_{\varnothing 50-30}$), 30 a 10 μm ($P_{\varnothing 30-10}$), 10 a 3 μm ($P_{\varnothing 10-3}$) e menor que 3 μm ($P_{\varnothing <3}$) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Variável	Ds	Pt	Mac	Mic	$P_{\varnothing 50-30}$	$P_{\varnothing 30-10}$	$P_{\varnothing 10-3}$	$P_{\varnothing <3}$
Ds	-	-	-	-	-	-	-	-
Pt	-0,62**	-	-	-	-	-	-	-
Mac	-0,59**	0,81**	-	-	-	-	-	-
Mic	-0,14**	0,44**	-0,17**	-	-	-	-	-
$P_{\varnothing 50-30}$	-0,01 ns	0,02 ns	-0,15**	0,26**	-	-	-	-
$P_{\varnothing 30-10}$	-0,15**	0,26**	0,17**	0,18**	-0,06 ns	-	-	-
$P_{\varnothing 10-3}$	0,14**	-0,23**	-0,24**	-0,02 ns	0,04 ns	-0,44**	-	-
$P_{\varnothing <3}$	-0,09 ns	0,32**	-0,13*	0,75**	-0,01 ns	-0,33**	-0,14**	-

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

A Pt ficou positivamente relacionada com as Mac, Mic, $P_{\varnothing 30-10}$ e $P_{\varnothing <3}$, e negativamente com a $P_{\varnothing 10-3}$. Ou seja, o aumento da porosidade total aumenta, sobretudo, os poros de classes de tamanho maior e diminui os poros com tamanho de 10 a 3 μm .

A Mac se relacionou negativamente com Mic, $P_{\varnothing 50-30}$, $P_{\varnothing 10-3}$ e $P_{\varnothing <3}$, o que significa que a compactação tende a aumentar a quantidade de poros menores em função da diminuição dos poros com tamanho acima de 50 μm .

A Mic apresentou relação positiva com os poros menores que 50 μm e estes se relacionaram negativamente entre si ($P_{\varnothing 30-10}$ e $P_{\varnothing 10-3}$, $P_{\varnothing 30-10}$ e $P_{\varnothing <3}$ e $P_{\varnothing 10-3}$ e $P_{\varnothing <3}$).

4.3.3. Curva de retenção, disponibilidade de água e condutividade hidráulica do solo saturado

A curva de retenção de água no solo expressa a relação entre a tensão de água e umidade retida, sendo afetada pela textura, condição estrutural e, principalmente, distribuição do tamanho de poros (HILLEL, 1998, KAISER, 2010).

O tráfego das máquinas de colheita da madeira alterou a curva de retenção de água no solo em ambas as posições até a camada de 40 cm de profundidade (Figura 71). Na camada de 0 a 10 cm, tanto na posição de trilha dos rodados (RD), como na posição de entre rodados (ER), o tráfego diminuiu a retenção de água da saturação até a tensão de 100 kPa, sendo os efeitos maiores após uma passada do *Harvester* mais duas passadas do *Forwarder* (H+2F). Na camada de 10 a 20 cm, na posição RD, o tráfego diminuiu a retenção da saturação até a tensão de 6 kPa, sendo maior a retenção depois dessa tensão e o tratamento H+16F o que causou mais efeitos. Na posição ER, a diminuição da retenção também ocorreu da saturação até a tensão de 6 kPa, porém, o efeito foi menor, pois nem todos os níveis de tráfego resultaram em alteração. A camada seguinte (20 a 40 cm) apresentou comportamento semelhante ao da camada anterior e, na camada mais profunda, somente os tratamentos H+2F e H+16F na posição RD e H+2F na posição ER, resultaram em redução da retenção da saturação até em torno de 10 kPa, sendo que nos outros tratamentos, em geral, a retenção de água foi semelhante ou superior à condição ST.

A redução da retenção de água, principalmente em tensões menores, pelo tráfego de máquinas de colheita da madeira também foi relatada por Startsev e MacNabb (2001), que avaliaram a compactação de diversos solos causada por diferentes máquinas de extração florestal em diversas condições de tensão de água do solo. Os autores associaram as alterações da curva de retenção devido ao tráfego afetar a distribuição de tamanho de poros, resultado do decréscimo do volume do solo em consequência da compressão do espaço poroso. Uma vez que ocorre a redução da retenção de água, principalmente os poros de classe de maior tamanho são afetados, resultando em menor porosidade de aeração e limitação no conteúdo de água disponível às plantas (WARKENTIN, 1971; DICKERSON, 1976; FROEHLICH; McNABB, 1984).

A umidade retida na capacidade de campo (CC) foi menor em quase todas as condições de tráfego na camada de 0 a 10 cm (Tabela 23). Na camada de 10 a 20 cm, somente diferiram com a condição ST, os tratamentos H+2F e H+16F na posição ER. Nas camadas de 20 a 40 e 40 a 60 cm, assim como na primeira camada, quase todos os níveis de tráfego diminuíram a CC.

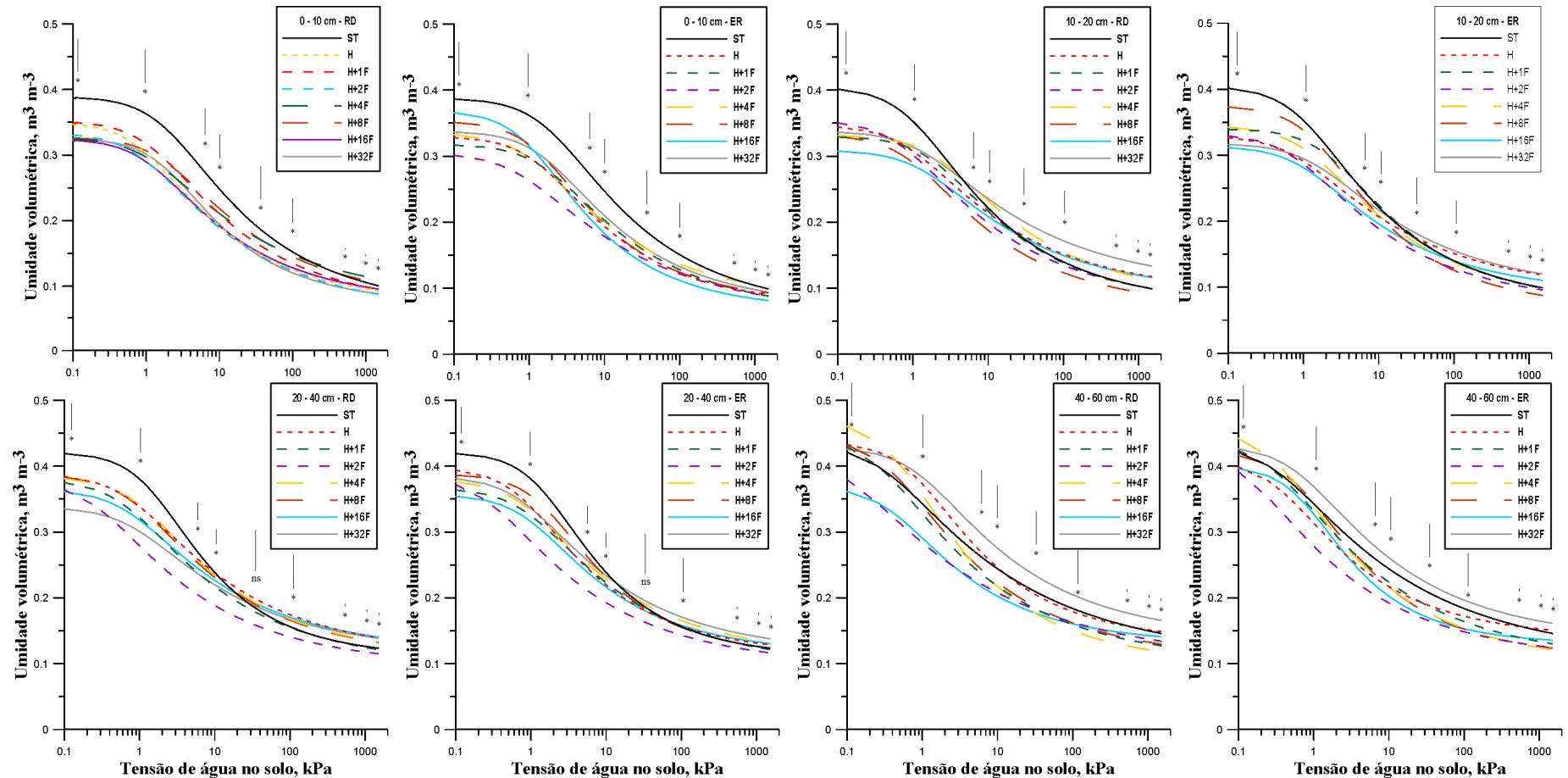


Figura 71 – Curvas de retenção de água em função das diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5 % pelo teste de Tukey; *significativo a 5%; ns não significativo.

Em relação à umidade retida no ponto de murcha permanente (PMP) (Tabela 23), em todas as camadas houve diferenças estatísticas, porém, embora o tráfego possa até ter comprimido os poros que retêm esse nível de umidade, os valores são mais associados a diferenças texturais entre os tratamentos, uma vez que textura e composição mineralógica são os principais fatores que regem a retenção de água correspondente à essa tensão de água (HILLEL, 1998).

Tabela 23 – Valores médios de umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	0,247 a ($\pm 0,016$)	0,227 ab ($\pm 0,071$)	0,254 a ($\pm 0,013$)	0,270 ab ($\pm 0,013$)	0,064 fgh ($\pm 0,006$)	0,074 bc ($\pm 0,001$)	0,110 c ($\pm 0,004$)	0,108 b ($\pm 0,003$)
H	RD	0,191 bcd ($\pm 0,025$)	0,210 abcd ($\pm 0,008$)	0,234 ab ($\pm 0,016$)	0,233 abcd ($\pm 0,014$)	0,070 def ($\pm 0,004$)	0,092 a ($\pm 0,006$)	0,112 bc ($\pm 0,005$)	0,133 a ($\pm 0,007$)
	ER	0,192 bcd ($\pm 0,014$)	0,204 abcd ($\pm 0,009$)	0,216 bcd ($\pm 0,026$)	0,219 cd ($\pm 0,003$)	0,071 de ($\pm 0,003$)	0,092 a ($\pm 0,005$)	0,114 abc ($\pm 0,006$)	0,139 a ($\pm 0,006$)
H+1F	RD	0,206 bcd ($\pm 0,027$)	0,220 abc ($\pm 0,007$)	0,219 bcd ($\pm 0,011$)	0,223 bcd ($\pm 0,035$)	0,061 gh ($\pm 0,003$)	0,076 b ($\pm 0,004$)	0,097 d ($\pm 0,005$)	0,103 b ($\pm 0,003$)
	ER	0,205 bcd ($\pm 0,011$)	0,226 ab ($\pm 0,011$)	0,224 bc ($\pm 0,021$)	0,236 abcd ($\pm 0,020$)	0,061 gh ($\pm 0,002$)	0,075 b ($\pm 0,003$)	0,096 d ($\pm 0,003$)	0,103 b ($\pm 0,007$)
H+2F	RD	0,188 bcd ($\pm 0,037$)	0,205 abcd ($\pm 0,014$)	0,188 e ($\pm 0,016$)	0,220 cd ($\pm 0,010$)	0,060 h ($\pm 0,002$)	0,073 bcd ($\pm 0,001$)	0,096 d ($\pm 0,001$)	0,103 b ($\pm 0,006$)
	ER	0,180 cd ($\pm 0,009$)	0,193 cd ($\pm 0,010$)	0,193 de ($\pm 0,019$)	0,204 d ($\pm 0,006$)	0,058 h ($\pm 0,003$)	0,073 b ($\pm 0,003$)	0,096 d ($\pm 0,003$)	0,106 b ($\pm 0,005$)
H+4F	RD	0,223 ab ($\pm 0,019$)	0,229 a ($\pm 0,027$)	0,234 ab ($\pm 0,009$)	0,218 cd ($\pm 0,015$)	0,079 ab ($\pm 0,003$)	0,073 bcd ($\pm 0,002$)	0,111 bc ($\pm 0,004$)	0,100 b ($\pm 0,004$)
	ER	0,202 bcd ($\pm 0,014$)	0,213 abcd ($\pm 0,014$)	0,231 ab ($\pm 0,023$)	0,217 cd ($\pm 0,021$)	0,078 abc ($\pm 0,003$)	0,072 bcd ($\pm 0,002$)	0,111 bc ($\pm 0,004$)	0,099 b ($\pm 0,003$)
H+8F	RD	0,217 abc ($\pm 0,026$)	0,197 abcd ($\pm 0,014$)	0,223 bc ($\pm 0,024$)	0,224 bcd ($\pm 0,016$)	0,082 a ($\pm 0,004$)	0,069 cd ($\pm 0,002$)	0,110 c ($\pm 0,004$)	0,107 b ($\pm 0,005$)
	ER	0,184 cd ($\pm 0,006$)	0,195 bcd ($\pm 0,024$)	0,218 bcd ($\pm 0,011$)	0,214 cd ($\pm 0,014$)	0,078 abc ($\pm 0,003$)	0,068 d ($\pm 0,004$)	0,110 c ($\pm 0,002$)	0,108 b ($\pm 0,005$)
H+16F	RD	0,193 bcd ($\pm 0,013$)	0,199 abcd ($\pm 0,017$)	0,220 bc ($\pm 0,009$)	0,204 d ($\pm 0,059$)	0,073 bcd ($\pm 0,003$)	0,091 a ($\pm 0,003$)	0,119 a ($\pm 0,006$)	0,130 a ($\pm 0,024$)
	ER	0,176 d ($\pm 0,013$)	0,188 d ($\pm 0,009$)	0,201 cde ($\pm 0,034$)	0,206 d ($\pm 0,004$)	0,067 efg ($\pm 0,003$)	0,090 a ($\pm 0,002$)	0,115 abc ($\pm 0,003$)	0,130 a ($\pm 0,002$)
H+32F	RD	0,191 bcd ($\pm 0,019$)	0,220 abcd ($\pm 0,028$)	0,211 bcde ($\pm 0,011$)	0,277 a ($\pm 0,077$)	0,072 cde ($\pm 0,002$)	0,094 a ($\pm 0,003$)	0,117 ab ($\pm 0,002$)	0,136 a ($\pm 0,008$)
	ER	0,203 bcd ($\pm 0,019$)	0,209 abcd ($\pm 0,006$)	0,225 bc ($\pm 0,016$)	0,264 abc ($\pm 0,042$)	0,071 de ($\pm 0,003$)	0,092 a ($\pm 0,003$)	0,115 abc ($\pm 0,002$)	0,135 a ($\pm 0,007$)
	Valor F	6,36**	4,34**	10,80**	5,83**	39,88**	73,76**	53,54**	23,61**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; **significativo a 1%; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

O tráfego do *Harvester* associado ao *Forwarder* ainda reduziu o conteúdo de água disponível para as plantas (AD) em todas as camadas avaliadas (Tabela 24), sendo isso associado às alterações de porosidade discutidas anteriormente.

Tabela 24 – Valores médios de conteúdo de água disponível (\pm desvio padrão) e condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Água disponível ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1})			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	0,183 a ($\pm 0,014$)	0,153 ab ($\pm 0,065$)	0,144 a ($\pm 0,017$)	0,162 a ($\pm 0,015$)	113,0 ($\pm 130,4$)	97,6 ab ($\pm 67,6$)	89,8 ab ($\pm 94,9$)	128,4 cd ($\pm 37,7$)
H	RD	0,121 bc ($\pm 0,023$)	0,118 cdef ($\pm 0,006$)	0,122 abcd ($\pm 0,016$)	0,100 bc ($\pm 0,010$)	66,7 ($\pm 24,9$)	32,0 b ($\pm 16,1$)	74,2 abcd ($\pm 47,4$)	73,5 cd ($\pm 68,5$)
	ER	0,121 bc ($\pm 0,016$)	0,112 def ($\pm 0,011$)	0,102 cdef ($\pm 0,032$)	0,080 c ($\pm 0,007$)	35,1 ($\pm 25,2$)	30,9 b ($\pm 33,5$)	71,3 cd ($\pm 57,2$)	88,2 cd ($\pm 77,3$)
H+1F	RD	0,145 b ($\pm 0,025$)	0,144 abcd ($\pm 0,004$)	0,122 abc ($\pm 0,008$)	0,120 abc ($\pm 0,038$)	48,9 ($\pm 44,6$)	25,1 b ($\pm 23,3$)	82,3 bcd ($\pm 115,1$)	208,0 bc ($\pm 207,3$)
	ER	0,145 b ($\pm 0,010$)	0,151 abc ($\pm 0,011$)	0,128 ab ($\pm 0,022$)	0,133 ab ($\pm 0,017$)	26,9 ($\pm 28,0$)	41,1 b ($\pm 38,8$)	81,9 abcd ($\pm 61,2$)	118,9 cd ($\pm 87,7$)
H+2F	RD	0,129 bc ($\pm 0,036$)	0,132 abcde ($\pm 0,014$)	0,093 ef ($\pm 0,016$)	0,117 abc ($\pm 0,009$)	53,1 ($\pm 47,6$)	41,6 b ($\pm 16,8$)	74,9 cd ($\pm 48,0$)	314,9 ab ($\pm 226,5$)
	ER	0,122 bc ($\pm 0,008$)	0,120 abcde ($\pm 0,011$)	0,097 def ($\pm 0,020$)	0,098 bc ($\pm 0,008$)	79,1 ($\pm 101,9$)	43,9 b ($\pm 26,0$)	138,9 d ($\pm 101,1$)	392,5 a ($\pm 144,7$)
H+4F	RD	0,144 b ($\pm 0,019$)	0,156 a ($\pm 0,028$)	0,122 abc ($\pm 0,007$)	0,118 abc ($\pm 0,013$)	20,1 ($\pm 18,7$)	6,4 b ($\pm 5,4$)	50,6 cd ($\pm 102,1$)	71,4 cd ($\pm 83,5$)
	ER	0,124 bc ($\pm 0,016$)	0,141 abcde ($\pm 0,014$)	0,120 abcd ($\pm 0,023$)	0,118 abc ($\pm 0,021$)	50,9 ($\pm 50,5$)	6,5 b ($\pm 3,4$)	36,7 cd ($\pm 35,3$)	38,0 cd ($\pm 10,8$)
H+8F	RD	0,135 bc ($\pm 0,026$)	0,128 abcdef ($\pm 0,014$)	0,113 bcde ($\pm 0,021$)	0,116 abc ($\pm 0,016$)	23,0 ($\pm 23,0$)	27,0 b ($\pm 23,0$)	17,2 bcd ($\pm 12,3$)	118,2 cd ($\pm 124,2$)
	ER	0,107 c ($\pm 0,005$)	0,127 abcdef ($\pm 0,026$)	0,108 bcdef ($\pm 0,012$)	0,106 bc ($\pm 0,015$)	73,4 ($\pm 56,4$)	258,6 a ($\pm 370,6$)	64,4 cd ($\pm 58,3$)	138,3 bcd ($\pm 126,9$)
H+16F	RD	0,120 bc ($\pm 0,014$)	0,108 ef ($\pm 0,017$)	0,101 cdef ($\pm 0,011$)	0,075 c ($\pm 0,036$)	12,9 ($\pm 17,3$)	18,8 b ($\pm 20,0$)	15,3 d ($\pm 13,1$)	47,5 cd ($\pm 32,1$)
	ER	0,109 bc ($\pm 0,014$)	0,097 f ($\pm 0,007$)	0,086 f ($\pm 0,033$)	0,077 c ($\pm 0,003$)	77,7 ($\pm 62,1$)	24,0 b ($\pm 29,7$)	63,0 d ($\pm 71,3$)	90,2 cd ($\pm 69,3$)
H+32F	RD	0,119 bc ($\pm 0,019$)	0,126 abcdef ($\pm 0,028$)	0,095 ef ($\pm 0,012$)	0,141 ab ($\pm 0,084$)	25,9 ($\pm 13,9$)	13,6 b ($\pm 14,9$)	49,3 a ($\pm 37,0$)	22,0 d ($\pm 19,3$)
	ER	0,132 bc ($\pm 0,019$)	0,117 def ($\pm 0,008$)	0,111 bcdef ($\pm 0,017$)	0,129 ab ($\pm 0,047$)	26,0 ($\pm 9,0$)	24,1 b ($\pm 20,2$)	52,2 abc ($\pm 35,0$)	31,8 cd ($\pm 23,6$)
	<i>Valor F</i>	6,79**	6,93**	10,26**	6,55**	1,74 ns	2,47*	1,56 ns	8,53**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) também tendeu a diminuir com o tráfego das máquinas (Tabela 24). Na camada de 0 a 10 cm, embora os valores médios tenham sido menores, em média até 60 %, comparando a situação inicial e após as sucessivas passadas, não houve diferenças estatísticas, devido à alta variabilidade dos valores. Na camada de 10 a 20 cm, o efeito do tráfego ficou evidente, pois quase todos os níveis de tráfego apresentaram diferenças estatísticas com ST, resultando numa redução de K_{sat} em torno de 60 % também. Na camada de 20 a 40 cm, foi principalmente a partir de H+2F que houve reduções significativas de K_{sat} (Tabela 24), porém, tal redução foi menor do que nas outras camadas, na ordem de 30 %. Já na camada mais profunda, o tráfego não alterou essa propriedade de maneira significativa.

Os resultados encontrados entram concordância com a literatura, pois, com o aumento da deformação do solo e diminuição da continuidade de poros, também ocorre redução do movimento interno de água, que pode ser traduzido em redução da condutividade hidráulica em 80 % ou mais (BENTHAUS; MATTHIES, 1993; OLIVEIRA et al., 1998) e em redução nas taxas de infiltração de 11,4 cm h⁻¹ em solo não perturbado para 1,1 cm h⁻¹ em solo submetido ao tráfego de máquinas (DICKERSON, 1976). Além disso, a redução de K_{sat} resulta em consequências iniciando com o comprometimento da entrada e redistribuição de água no perfil do solo, gerando maiores perdas de água por escoamento e, assim, aumentando o potencial de erosão e causando alterações no balanço hidrológico (HARR et al., 1979; HANZA; ANDERSON, 2005).

A condutividade hidráulica do solo saturado se relacionou de forma negativa com a densidade do solo e de forma positiva com a porosidade total e macroporosidade (Figura 72), à semelhança ao encontrado por Silva (2003a), Suzuki (2008) e Kaiser (2010).

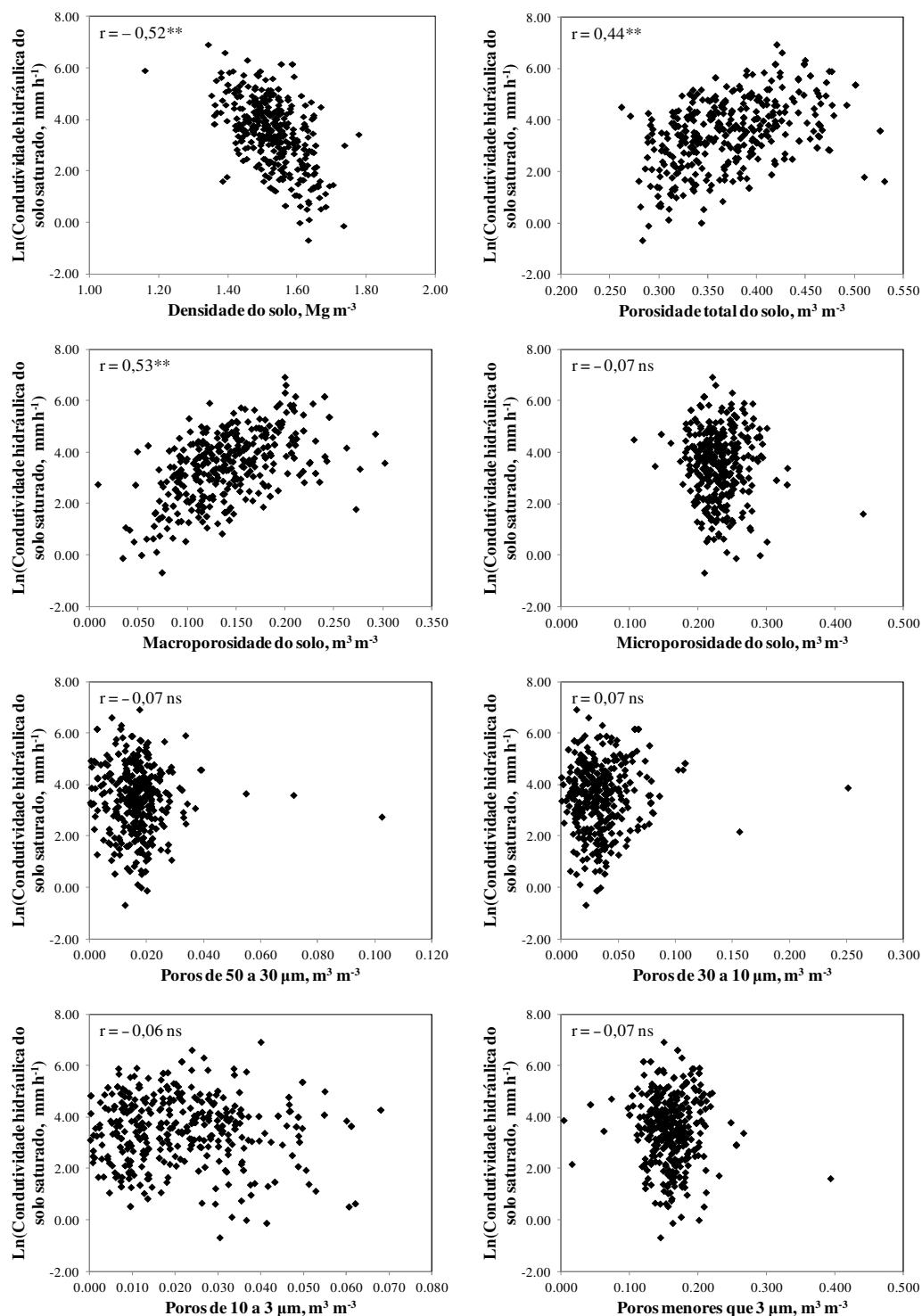


Figura 72 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o logaritmo natural da condutividade hidráulica do solo saturado com a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e classes de tamanho de poros no Cambissolo Háplico Tb Distrófico. *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

Dessa maneira, tendo em vista a dependência dessa propriedade em função principalmente da D_s e Mac , foram ajustadas equações de regressão linear múltipla por

Stepwise para estimativa da condutividade hidráulica logaritmizada nas quatro camadas avaliadas (Tabela 25).

Salienta-se que, buscando um melhor ajuste das equações, eliminaram-se dados *outliers* e, também, foi testado o uso de combinações das variáveis explicativas de forma pura, inversa, potencializada e logaritmizada, devido à possibilidade da relação destas não ser linear.

Tabela 25 – Equações ajustadas para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado em logaritmo natural para as quatro camadas avaliadas no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Camada (cm)	Equação ajustada	R ²	Syx	Valor F	N
0 – 10	$\text{LnKsat} = 10,233 - 1,988 \text{Ds}^2 + 0,489 \text{Ln}(\text{Mac}^2)$	0,62	34,4	61,7**	77
10 – 20	$\text{LnKsat} = 14,723 - 4,828 \text{Ds}^2$	0,60	73,8	116,2**	80
20 – 40	$\text{LnKsat} = 12,399 - 2,917 \text{Ds}^2 + 0,557 \text{Ln}(\text{Mac}^2)$	0,34	66,6	22,1**	88
40 – 60	$\text{LnKsat} = 37,788 - 61,911 \text{Mac} + 6,415 \text{Ln}(\text{Mac}^2)$	0,35	128,3	21,4**	81

**significativo a 1 %; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em mm h⁻¹; Ln: logaritmo natural; Ksat: condutividade hidráulica do solo saturado (mm h⁻¹); Ds: densidade do solo (Mg m⁻³); Mac: macroporosidade (m³ m⁻³); N: número de repetições.

Como a Ksat apresenta alta variabilidade (SILVA, 2003a; LIMA et al., 2006), pode-se considerar que o ajuste da equação foi relativamente bom nas camadas superiores de solo, apresentando um coeficiente de determinação em torno de 60 %, em discordância ao observado nas camadas inferiores (Tabela 25).

Na tentativa de estimar qual poderia ser considerado um valor crítico de Ksat, em semelhança a Silva (2003a), Suzuki (2008), Reichert et al. (2009), Kaiser (2010) e outros, foram substituídas nas equações, o valor de Ds pelos valores de D_scIHO_{RP2MPa} e D_scIHO_{RP3MPa} (Tabela 4, p. 47) e o valor de Mac equivalente às densidades críticas.

Na camada de 0 a 10 cm, os valores de Ksat críticos foram de 24,8 e 8,2 mm h⁻¹ para D_scIHO_{RP2MPa} e D_scIHO_{RP3MPa}, respectivamente. Na camada de 10 a 20 cm, os valores foram de 16,9 e 5,7 mm h⁻¹ para D_scIHO_{RP2MPa} e D_scIHO_{RP3MPa}, respectivamente. Na camada de 20 a 40 cm, os valores foram de 18,6 e 7,0 mm h⁻¹ para D_scIHO_{RP2MPa} e D_scIHO_{RP3MPa}, respectivamente. Por fim, na camada de 40 a 60 cm, como a Ds não participou da equação, foi utilizado o valor de Mac de 0,10 m³ m⁻³, resultando num valor de Ksat crítico de 7,8 mm h⁻¹.

Comparando, em base logarítmica, os valores de Ksat observados nos tratamentos com os valores críticos estimados (Figura 73) pode-se ver que na posição de trilha dos rodados

(RD), a K_{sat} crítica baseada na $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ já foi ultrapassada após a condição de tráfego H+4F nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Na camada de 20 a 40 cm, a K_{sat} crítica baseada na $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ foi ultrapassada com um nível de tráfego superior às camadas anteriores, ou seja, H+8F. Os valores de K_{sat} críticos baseados na $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$ nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm e K_{sat} crítico, quando Mac for igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 40 a 60 cm, não foram excedidos (Figura 73a). Na posição de entre rodados, os níveis de tráfego não ultrapassaram os valores críticos de K_{sat} , exceto na camada de 10 a 20 cm com H+4F, demonstrando que, embora na posição de entre rodados tenha havido impactos no solo, estes foram em menor magnitude em comparação à posição de trilha dos rodados (Figura 73b).

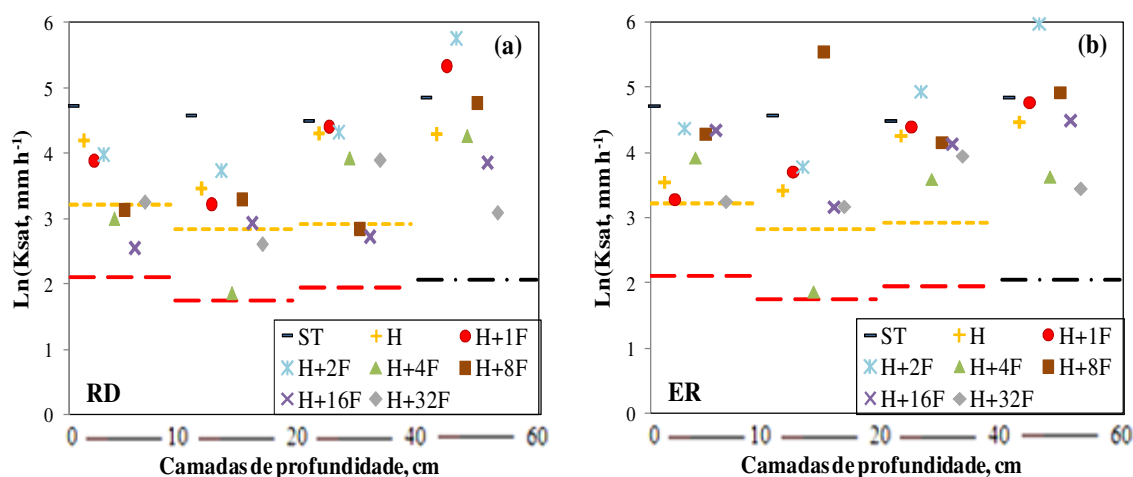


Figura 73 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em logaritmo natural nas diferentes intensidades de tráfego, posição de trilha dos rodados (a) e entre rodados (b) nas quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados; linhas tracejadas laranja e vermelha indicam valor limite de K_{sat} para camada em função da $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$ e $D_{s_c}IHO_{RP3MPa}$, respectivamente; linha tracejada preta indica valor limite de K_{sat} em função da macroporosidade igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada de 40 a 60 cm.

4.3.4. Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) na tensão de 6 kPa foi reduzida significativamente em função de todos os níveis de tráfego submetidos na camada de 0 a 10 cm. Na camada de 10 a 20 cm, apesar de ter havido diferenças significativas entre os

tratamentos, não houve redução significativa de Ka em relação a ST. Nas camadas mais profundas, a Ka foi reduzida, principalmente, após a condição H+1F (Tabela 26).

Na tensão de 10 kPa, houve redução significativa de Ka em quase todos os níveis de tráfego na camada de 0 a 10 cm, enquanto nas outras camadas não foram constatadas diferenças significativas devido à alta variabilidade dos dados, embora a Ka tenha sido reduzida pelas condições de tráfego (Tabela 26).

Tabela 26 – Valores médios de permeabilidade do solo ao ar (\pm desvio padrão) nas tensões de água de 6 e 10 kPa nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

		Permeabilidade do solo ar (μm^2)							
Tratamento	Posição	Tensão de 6 kPa				Tensão de 10 kPa			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	233,0 a ($\pm 134,4$)	92,9 abc ($\pm 81,9$)	152,3 a ($\pm 160,3$)	162,7 ab ($\pm 99,0$)	227,7 a ($\pm 86,3$)	159,0 ($\pm 164,8$)	127,8 ($\pm 138,2$)	91,4 a ($\pm 90,3$)
H	RD	82,5 bc ($\pm 68,7$)	162,7 a ($\pm 117,1$)	101,2 abc ($\pm 100,7$)	91,5 abcd ($\pm 47,8$)	86,3 bc ($\pm 50,2$)	36,2 ($\pm 23,1$)	75,9 ($\pm 66,1$)	86,3 a ($\pm 50,5$)
	ER	77,4 bc ($\pm 44,2$)	49,7 bc ($\pm 19,3$)	60,0 bc ($\pm 19,4$)	119,1 abc ($\pm 8,8$)	83,8 bc ($\pm 54,8$)	67,5 ($\pm 68,4$)	42,5 ($\pm 17,8$)	27,5 a ($\pm 3,3$)
H+1F	RD	28,5 c ($\pm 13,5$)	30,4 c ($\pm 19,2$)	31,1 c ($\pm 22,5$)	84,2 bcd ($\pm 46,0$)	62,1 bc ($\pm 72,0$)	35,6 ($\pm 15,8$)	31,1 ($\pm 12,5$)	51,9 a ($\pm 13,1$)
	ER	12,9 c ($\pm 6,4$)	40,7 bc ($\pm 30,8$)	28,8 c ($\pm 21,4$)	39,3 cd ($\pm 22,4$)	14,6 c ($\pm 8,5$)	53,5 ($\pm 69,7$)	27,5 ($\pm 8,3$)	49,0 a ($\pm 7,5$)
H+2F	RD	30,0 c ($\pm 17,3$)	71,8 abc ($\pm 82,9$)	62,8 bc ($\pm 46,3$)	57,2 cd ($\pm 20,6$)	28,7 c ($\pm 6,7$)	45,6 ($\pm 36,2$)	78,6 ($\pm 43,2$)	52,5 a ($\pm 17,8$)
	ER	42,4 bc ($\pm 30,9$)	19,8 c ($\pm 7,9$)	80,5 abc ($\pm 16,6$)	68,1 cd ($\pm 12,8$)	31,2 c ($\pm 15,0$)	34,6 ($\pm 34,7$)	80,6 ($\pm 14,6$)	72,8 a ($\pm 27,2$)
H+4F	RD	74,0 bc ($\pm 57,1$)	103,7 abc ($\pm 109,7$)	49,7 c ($\pm 26,0$)	91,2 abcd ($\pm 55,0$)	124,2 abc ($\pm 60,3$)	84,4 ($\pm 59,7$)	29,6 ($\pm 19,5$)	47,0 a ($\pm 20,7$)
	ER	139,7 ab ($\pm 119,3$)	128,3 ab ($\pm 77,6$)	125,4 ab ($\pm 46,1$)	169,1 a ($\pm 116,4$)	120,0 abc ($\pm 83,7$)	102,6 ($\pm 69,1$)	102,1 ($\pm 121,4$)	79,2 a ($\pm 57,4$)
H+8F	RD	95,6 bc ($\pm 38,8$)	101,7 abc ($\pm 46,1$)	98,0 abc ($\pm 17,7$)	96,0 abcd ($\pm 76,7$)	178,1 ab ($\pm 136,9$)	70,0 ($\pm 58,9$)	75,0 ($\pm 48,0$)	98,2 a ($\pm 60,7$)
	ER	60,8 bc ($\pm 54,4$)	79,7 abc ($\pm 26,8$)	44,6 c ($\pm 44,5$)	87,2 abcd ($\pm 1,9$)	39,4 c ($\pm 24,7$)	67,7 ($\pm 60,3$)	34,0 ($\pm 24,1$)	87,2 a ($\pm 2,4$)
H+16F	RD	18,4 c ($\pm 14,7$)	59,4 bc ($\pm 47,7$)	75,4 bc ($\pm 38,7$)	30,4 d ($\pm 12,2$)	41,8 c ($\pm 38,3$)	25,3 ($\pm 12,4$)	119,9 ($\pm 60,7$)	29,7 a ($\pm 16,7$)
	ER	26,7 c ($\pm 11,0$)	52,1 bc ($\pm 49,2$)	28,5 c ($\pm 16,7$)	46,8 cd ($\pm 21,3$)	31,3 c ($\pm 19,3$)	72,9 ($\pm 47,0$)	54,1 ($\pm 36,0$)	92,7 a ($\pm 73,0$)
H+32F	RD	27,4 c ($\pm 7,4$)	65,2 bc ($\pm 63,0$)	46,4 c ($\pm 48,2$)	72,9 cd ($\pm 21,6$)	29,2 c ($\pm 22,9$)	47,3 ($\pm 21,6$)	37,6 ($\pm 16,7$)	45,3 a ($\pm 17,3$)
	ER	52,9 bc ($\pm 38,6$)	40,4 bc ($\pm 12,4$)	66,4 bc ($\pm 17,2$)	52,3 cd ($\pm 30,3$)	45,9 c ($\pm 81,7$)	52,1 ($\pm 50,0$)	76,1 ($\pm 24,6$)	27,0 a ($\pm 17,1$)
<i>Valor F</i>		8,73**	4,15**	6,24**	6,00**	6,40**	1,72 ns	1,92 ns	3,06*

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Na tensão de 33 kPa, de modo parecido à tensão anterior, somente houve alteração significativa de Ka na camada de 0 a 10 cm, embora os dados ainda apresentem considerável variabilidade (Tabela 27).

Tabela 27 – Valores médios de permeabilidade do solo ar (\pm desvio padrão) nas tensões de água de 33 e 100 kPa nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

		Permeabilidade do solo ar (μm^2)							
Tratamento	Posição	Tensão de 33 kPa				Tensão de 100 kPa			
		Camada (cm)				Camada (cm)			
		0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	-	130,7 a ($\pm 49,5$)	102,7 ($\pm 87,7$)	53,0 ($\pm 51,3$)	25,7 ($\pm 8,9$)	164,1 ($\pm 125,9$)	116,4 a ($\pm 88,9$)	164,9 a ($\pm 122,7$)	132,9 a ($\pm 66,4$)
H	RD	89,4 ab ($\pm 36,1$)	65,4 ($\pm 43,3$)	104,8 ($\pm 121,8$)	64,8 ($\pm 11,3$)	71,0 ($\pm 43,8$)	62,5 a ($\pm 33,0$)	102,5 abc ($\pm 91,9$)	75,9 ab ($\pm 57,2$)
	ER	72,5 ab ($\pm 24,1$)	45,4 ($\pm 31,5$)	28,7 ($\pm 68,4$)	41,6 ($\pm 9,5$)	88,8 ($\pm 90,0$)	38,4 a ($\pm 22,2$)	37,9 bc ($\pm 24,3$)	45,7 b ($\pm 10,3$)
H+1F	RD	116,4 ab ($\pm 123,7$)	53,8 ($\pm 38,6$)	42,5 ($\pm 31,9$)	157,8 ($\pm 161,8$)	55,8 ($\pm 44,6$)	37,1 a ($\pm 29,7$)	42,1 bc ($\pm 23,7$)	66,5 b ($\pm 20,9$)
	ER	45,7 ab ($\pm 60,9$)	54,1 ($\pm 64,6$)	37,5 ($\pm 69,7$)	43,1 ($\pm 18,9$)	16,5 ($\pm 11,3$)	20,3 a ($\pm 15,0$)	26,2 c ($\pm 11,8$)	51,1 b ($\pm 15,0$)
H+2F	RD	33,9 ab ($\pm 24,9$)	45,4 ($\pm 26,4$)	95,5 ($\pm 74,6$)	63,9 ($\pm 18,0$)	22,0 ($\pm 8,8$)	38,1 a ($\pm 18,1$)	82,7 abc ($\pm 56,4$)	64,2 b ($\pm 26,1$)
	ER	19,7 b ($\pm 18,3$)	29,0 ($\pm 10,1$)	34,7 ($\pm 34,7$)	127,1 ($\pm 145,6$)	19,8 ($\pm 19,2$)	18,5 a ($\pm 7,3$)	112,9 abc ($\pm 40,8$)	99,9 ab ($\pm 55,8$)
H+4F	RD	48,4 ab ($\pm 33,0$)	70,4 ($\pm 47,3$)	72,0 ($\pm 94,9$)	64,8 ($\pm 44,0$)	40,7 ($\pm 13,4$)	57,9 a ($\pm 49,1$)	63,0 abc ($\pm 49,2$)	85,4 ab ($\pm 42,1$)
	ER	73,2 ab ($\pm 34,2$)	59,4 ($\pm 42,9$)	83,7 ($\pm 69,1$)	66,4 ($\pm 15,5$)	126,1 ($\pm 172,3$)	67,1 a ($\pm 35,8$)	133,0 ab ($\pm 79,8$)	85,5 ab ($\pm 26,7$)
H+8F	RD	67,6 ab ($\pm 58,0$)	43,6 ($\pm 15,8$)	33,3 ($\pm 14,9$)	64,2 ($\pm 47,8$)	60,9 ($\pm 66,8$)	37,1 a ($\pm 23,2$)	92,5 abc ($\pm 78,7$)	84,1 ab ($\pm 50,9$)
	ER	53,5 ab ($\pm 24,6$)	86,5 ($\pm 85,5$)	37,7 ($\pm 60,3$)	127,4 ($\pm 58,9$)	35,6 ($\pm 11,2$)	103,4 a ($\pm 120,7$)	76,6 abc ($\pm 57,1$)	81,2 ab ($\pm 11,1$)
H+16F	RD	33,3 ab ($\pm 32,3$)	58,8 ($\pm 49,6$)	41,1 ($\pm 22,0$)	85,2 ($\pm 113,6$)	79,3 ($\pm 160,8$)	17,7 a ($\pm 5,0$)	44,6 bc ($\pm 41,6$)	43,0 b ($\pm 21,4$)
	ER	43,8 ab ($\pm 21,9$)	34,6 ($\pm 19,2$)	19,7 ($\pm 47,0$)	87,8 ($\pm 46,8$)	37,7 ($\pm 18,6$)	16,9 a ($\pm 5,1$)	25,4 c ($\pm 11,5$)	53,8 b ($\pm 21,9$)
H+32F	RD	46,2 ab ($\pm 50,6$)	44,6 ($\pm 37,5$)	28,8 ($\pm 10,6$)	74,4 ($\pm 34,1$)	28,7 ($\pm 31,7$)	35,5 a ($\pm 38,9$)	32,5 bc ($\pm 18,3$)	72,1 b ($\pm 28,1$)
	ER	23,2 b ($\pm 12,4$)	58,7 ($\pm 45,5$)	55,5 ($\pm 50,0$)	39,6 ($\pm 26,4$)	29,2 ($\pm 27,6$)	24,4 a ($\pm 15,0$)	66,6 abc ($\pm 46,2$)	40,3 b ($\pm 31,9$)
<i>Valor F</i>		2,60**	0,96 ns	1,21 ns	1,81 ns	1,70 ns	2,26*	4,12**	4,40**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Por fim, na tensão de 100 kPa, diferentemente do observado nas tensões anteriores, houveram diferenças estatísticas em função do tráfego somente nas camadas de 20 a 40 e 40 a 60 cm, sendo os menores valores, em geral, após uma passada do *Harvester* mais dezesseis do *Forwarder* (H+16F).

Nota-se que, na condição ST, quanto mais próxima da superfície foi a camada, maior foi, em geral, o valor de Ka, uma vez que isso é associado à maior quantidade e continuidade dos poros das camadas mais superficiais (STRECK, 2007; SEQUINATTO, 2010). Nos tratamentos de tráfego isso não é verificado, mostrando o quanto foi impactante a ação do tráfego sobre o solo. Considerando todas as tensões, a redução média de Ka pelo tráfego das máquinas foi em torno de 70, 50, 40 e 20 % para as camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, respectivamente.

Em geral, a Ka se relacionou de forma significativa, principalmente, com a Ds, Pt, Mac, poros de 50 a 30, 30 a 10 e 10 a 3 μm , além da Ksat (Tabela 28). Isso demonstra que os poros de maior diâmetro, na presente condição, foram responsáveis pelo fluxo de ar no solo, uma vez que os poros menores podem não ter apresentado relação devido à estarem retendo umidade nas tensões em que foi avaliada a Ka.

Tabela 28 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o logaritmo natural da permeabilidade do solo ao ar nas tensões de água de 6, 10, 33 e 100 kPa com a densidade (Ds), porosidade total (Pt), classes de tamanho de poros e logaritmo natural da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tensão (kPa)	Ds	Pt	Diâmetro de poros (μm)					Ln(Ksat)	
			> 50 (Mac)	< 50 (Mic)	50 a 30	30 a 10	10 a 3		< 3
6	-0,13*	0,33**	0,29**	0,13*	-0,14**	0,12*	-0,28**	0,20**	0,14**
10	-0,06 ns	0,21**	0,20**	0,05 ns	-0,12*	0,13*	-0,18**	0,07 ns	0,12*
33	-0,12*	0,26**	0,26**	0,05 ns	-0,01 ns	0,16**	-0,12*	-0,02 ns	0,22**
100	-0,32**	0,48**	0,44**	0,14**	-0,13*	0,30**	-0,30**	0,09 ns	0,32**

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

Com base nas relações, seguindo o que também foi feito para condutividade hidráulica do solo saturado, foram ajustadas equações de regressão linear múltipla por *Stepwise* para estimativa da permeabilidade do solo ao ar nas tensões analisadas (Tabela 29). As melhores equações foram ajustadas para as camadas de 0 a 10 e 40 a 60 cm, com coeficiente de determinação de 0,57 e 0,49, podendo ser considerados ajustes razoáveis, tendo em vista a variabilidade dos dados.

Em sequência, na tentativa de se estimar valores críticos de Ka, foram substituídas nas equações, os valores de Ds, desta vez, somente pelos valores de $D_{ScIHO_{RP3MPa}}$ (Tabela 4, p. 47), e o valor das porosidades equivalentes a essa densidade crítica. Optou-se pelo uso somente de $D_{ScIHO_{RP3MPa}}$ devido ao cálculo dos valores de Ka críticos com base na $D_{ScIHO_{RP2MPa}}$ resultarem em valores semelhantes a $D_{ScIHO_{RP3MPa}}$ e, portanto, não sendo usados, uma vez também que a $D_{ScIHO_{RP3MPa}}$ é melhor relacionada com a possível restrição do sistema radicular de espécies florestais, como discutido no Estudo I (p. 83).

Tabela 29 – Equações ajustadas para estimativa da permeabilidade do solo ao ar em logaritmo natural nas tensões de água de 6, 10, 33 e 100 kPa no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tensão	Equação ajustada	R ²	Syx	Valor F
6	$\text{LnKa} = -6,351 + 37,158 \text{ Mac} + 4,414 P_{\varnothing < 3} - 23,553 \text{ LnDs} - 0,795 \text{ LnMac} + 0,995 \text{ LnMic} - 0,272 \text{ Ln}P_{\varnothing 10-3} + 6,237 \text{ Ds}^2 - 70,804 \text{ Mac}^2$	0,57	0,460	42,0**
10	$\text{LnKa} = -2,136 + 6,345 \text{ Mac} - 24,192 \text{ LnDs} - 0,395 \text{ Ln}P_{\varnothing 50-30} + 5,718 \text{ Ds}^2 + 189,195 P_{\varnothing 50-30}^2$	0,24	0,617	18,4**
33	$\text{LnKa} = 38,980 - 48,143 \text{ Ds} + 0,423 \text{ Ln}P_{\varnothing 30-10} + 16,689 \text{ Ds}^2 + 0,024 \text{ LnKsat}^2 - 11,27 \text{ Mac}^2 + 8,407 P_{\varnothing < 3}^2$	0,40	0,493	30,3**
100	$\text{LnKa} = 0,493 + 16,675 \text{ Mac} + 6,402 P_{\varnothing < 3} + 12,961 P_{\varnothing 30-10} - 27,373 \text{ Mac}^2$	0,49	0,542	69,5**

**significativo a 1 %; R²: coeficiente de determinação; Syx: erro-padrão da estimativa em Ln(μm^2); Ln: logaritmo natural; Ka: permeabilidade do solo ao ar (μm^2); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Mac: macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Mic: microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $P_{\varnothing 50-30}$: poros com diâmetro entre a 50 a 30 μm ; $P_{\varnothing 30-10}$: poros com diâmetro entre a 30 a 10 μm ; $P_{\varnothing 10-3}$: poros com diâmetro entre a 10 a 3 μm ; $P_{\varnothing < 3}$: poros com diâmetro menor que 3 μm .

Os valores críticos de Ka foram de 38, 38, 67 e 17 μm^2 , para as tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa, respectivamente. Comparando os valores críticos estimados com valores críticos da literatura, estes ficaram acima do valor considerado como de baixa permeabilidade do solo ao ar, sendo de 20 μm^2 , de acordo com Fish e Koppi (1994), exceto na tensão de 100 kPa. Ball et al. (1988) sugerem que o valor limite para que o solo não seja considerado impermeável é de 1 μm^2 , sendo que abaixo desse valor, provavelmente, as trocas gasosas ficam estritamente limitadas.

Os valores de Ka críticos baseados na $D_{ScIHO_{RP3MPa}}$ foram excedidos devido ao tráfego em maior ou menor magnitude em todas as camadas, considerando ambas posições e tensões de água, exceto na camada de 40 a 60 cm na posição de trilha dos rodados. Já o valor crítico sugerido por Fish e Koppi (1994) foi excedido devido ao tráfego em poucas situações, sobretudo, na camada de 0 a 10 cm de profundidade (Figura 74). Esses indicadores sugerem

atenção à compactação causada pelas sucessivas passadas das máquinas, principalmente nas camadas mais superficiais do solo.

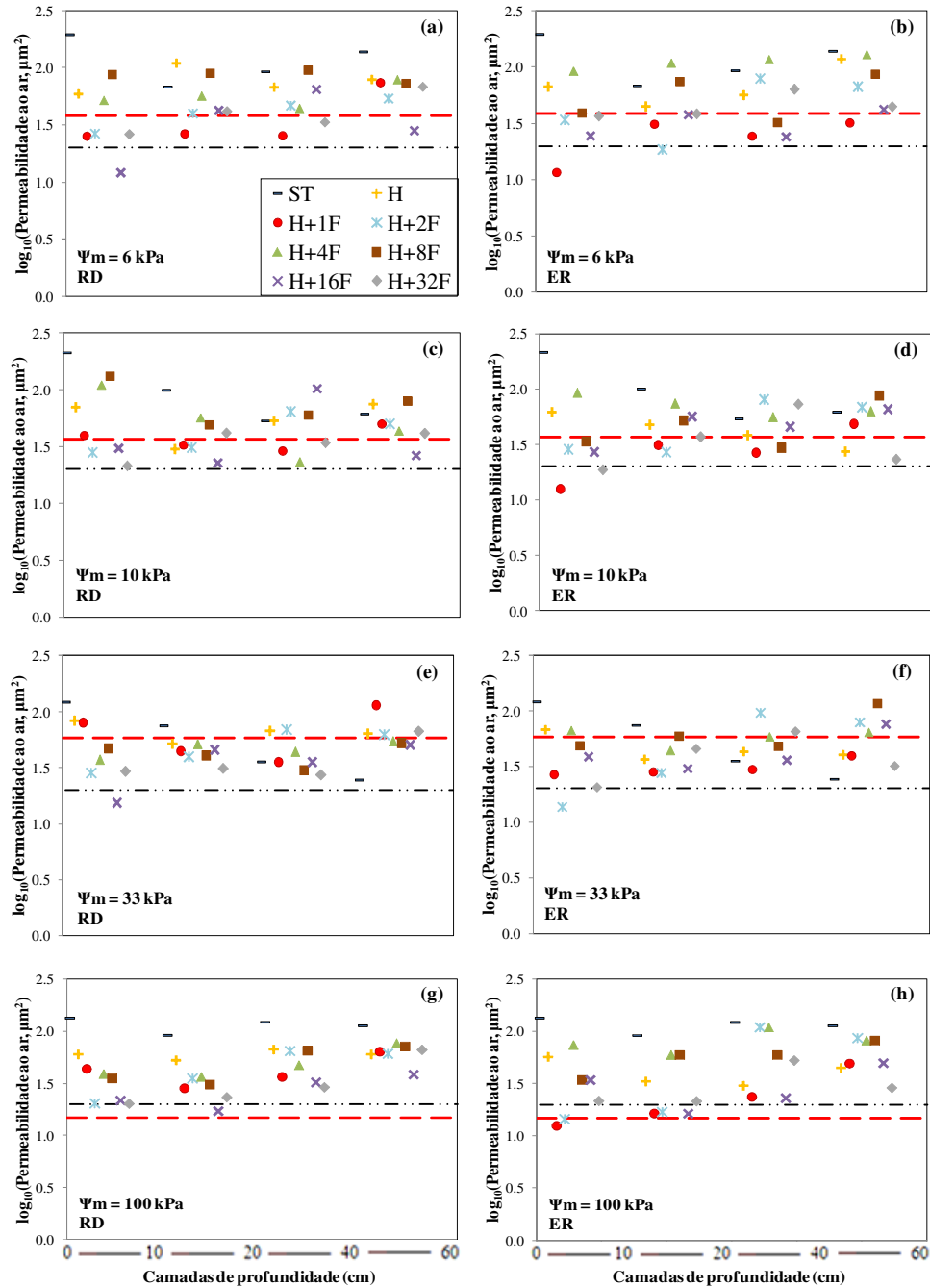


Figura 74 – Permeabilidade do solo ao ar em logaritmo base dez nas tensões de água de 6 kPa (a,b), 10 kPa (c,d), 33 kPa (e,f) e 100 kPa (g,h); ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados; linhas tracejadas vermelha e preta indicam valor limite de K_a em função da $D_{s_c}IHO_{3MPa}$ e de acordo com Fish e Koppi (1994), respectivamente.

4.3.5. Resistência do solo à penetração

Os valores de resistência do solo à penetração (RPC) *in situ* na posição de trilha dos rodados (RD) tenderam a ser maiores com o acúmulo de passadas das máquinas, sobretudo nas camadas mais superficiais. Porém, da mesma forma que para as propriedades anteriormente discutidas, alterações já ocorreram em intensidades de tráfego iniciais (Figura 75), sendo significativas a partir de H+4F na camada de 0 a 10 cm, H para o intervalo de 10 a 40 cm e H+8F para a camada de 40 a 50 cm e sem alterações significativas na camada de 50 a 60 cm (Tabela 30).

Na posição entre rodados (ER), os valores foram consideravelmente menores em comparação à posição RD e, dessa forma, essas alterações podem ser consideradas residuais, contudo, evidenciam que o tráfego intenso foi capaz de afetar áreas além das trilhas de passagem das máquinas, como também verificado nas outras propriedades. Nessa posição, a princípio as primeiras passadas de tráfego não causaram alterações, porém, com o aumento do tráfego, alterações foram detectadas (Figura 75), contudo, foi somente significativa em relação à ST, a condição H+32F na camada de 30 a 40 cm (Tabela 30).

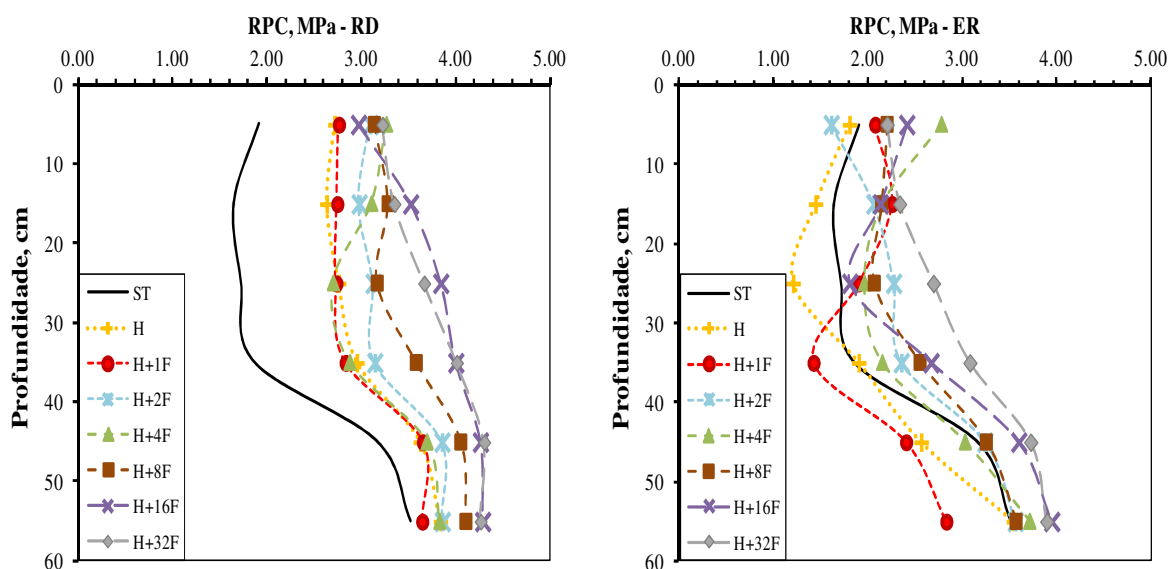


Figura 75 – Valores médios de resistência do solo à penetração a campo para as diferentes intensidades de tráfego nas posições de trilhas dos rodados (a) e entre rodados (b) no Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD = trilha dos rodados; ER = entre rodados.

Tabela 30 – Valores médios de resistência do solo à penetração a campo (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego e posições para as seis camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Posição	Resistência do solo à penetração (MPa)					
		Camada (cm)					
		0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60
ST	-	1,91 de ($\pm 0,42$)	1,65 f ($\pm 0,20$)	1,73 fg ($\pm 0,42$)	1,86 fg ($\pm 0,60$)	3,17 bcde ($\pm 0,65$)	3,52 ab ($\pm 0,70$)
H	RD	2,71 abcd ($\pm 0,61$)	2,63 bcde ($\pm 0,42$)	2,76 cde ($\pm 0,58$)	2,95 bcd ($\pm 0,53$)	3,62 abc ($\pm 0,44$)	3,83 a ($\pm 0,03$)
	ER	1,81 de ($\pm 1,15$)	1,45 f ($\pm 1,17$)	1,21 g ($\pm 0,60$)	1,91 efg ($\pm 0,83$)	2,57 de ($\pm 0,63$)	3,54 ab ($\pm 0,16$)
H+1F	RD	2,76 abcd ($\pm 0,72$)	2,74 bcde ($\pm 0,74$)	2,73 cde ($\pm 0,84$)	2,83 de ($\pm 0,93$)	3,65 abc ($\pm 0,73$)	3,64 a ($\pm 0,74$)
	ER	2,08 cde ($\pm 0,78$)	2,26 def ($\pm 0,86$)	1,91 efg ($\pm 0,77$)	1,43 g ($\pm 0,61$)	2,41 e ($\pm 0,75$)	2,83 b ($\pm 0,77$)
H+2F	RD	3,09 ab ($\pm 0,81$)	2,97 abcd ($\pm 0,70$)	3,12 abcd ($\pm 0,65$)	3,14 bc ($\pm 0,58$)	3,85 ab ($\pm 0,51$)	3,85 a ($\pm 0,61$)
	ER	1,62 e ($\pm 0,54$)	2,06 ef ($\pm 0,49$)	2,28 defg ($\pm 0,35$)	2,36 defg ($\pm 0,59$)	3,24 bcde ($\pm 0,66$)	3,57 ab ($\pm 0,61$)
H+4F	RD	3,26 a ($\pm 0,67$)	3,11 abc ($\pm 0,63$)	2,70 cde ($\pm 0,67$)	2,88 bcd ($\pm 0,65$)	3,69 abc ($\pm 0,68$)	3,83 a ($\pm 0,59$)
	ER	2,79 abcd ($\pm 0,77$)	2,16 def ($\pm 0,73$)	1,97 efg ($\pm 0,48$)	2,16 efg ($\pm 0,65$)	3,04 cde ($\pm 0,55$)	3,72 ($\pm 0,45$)
H+8F	RD	3,13 ab ($\pm 0,48$)	3,28 ab ($\pm 0,58$)	3,17 abc ($\pm 0,56$)	3,58 ab ($\pm 0,49$)	4,05 a ($\pm 0,43$)	4,10 a ($\pm 0,44$)
	ER	2,21 cde ($\pm 0,94$)	2,15 ef ($\pm 0,75$)	2,07 efg ($\pm 0,77$)	2,56 def ($\pm 0,82$)	3,26 bcde ($\pm 0,79$)	3,57 ab ($\pm 0,84$)
H+16F	RD	2,97 abc ($\pm 0,53$)	3,52 a ($\pm 0,40$)	3,84 a ($\pm 0,31$)	3,99 a ($\pm 0,19$)	4,26 a ($\pm 0,19$)	4,28 a ($\pm 0,17$)
	ER	2,42 abcde ($\pm 0,76$)	2,14 def ($\pm 0,81$)	1,81 efg ($\pm 0,45$)	2,67 cdef ($\pm 0,53$)	3,60 abcd ($\pm 0,53$)	3,95 a ($\pm 0,60$)
H+32F	RD	3,22 ab ($\pm 0,49$)	3,34 ab ($\pm 0,48$)	3,66 ab ($\pm 0,53$)	4,01 a ($\pm 0,41$)	4,30 a ($\pm 0,14$)	4,26 a ($\pm 0,23$)
	ER	2,21 bcde ($\pm 0,34$)	2,34 cdef ($\pm 0,59$)	2,70 bcdef ($\pm 0,61$)	3,08 acbd ($\pm 0,50$)	3,73 abc ($\pm 0,41$)	3,90 a ($\pm 0,42$)
<i>Valor F</i>		8,12**	12,49**	15,63**	16,18**	9,67**	4,74**

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; **significativo a 1%; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; RD: trilha dos rodados; ER: entre rodados.

Por meio dos mapas de isolinhas de RPC (Figura 76), ficou mais claro e evidente que o tráfego das máquinas de colheita de madeira causou alterações nessa propriedade. Nas condições de baixa intensidade de tráfego, o perfil foi impactado, praticamente, somente abaixo da linha dos rodados. Porém, conforme o tráfego intensificou-se, os efeitos foram maiores, afetando áreas além da zona abaixo da trilha de passagem dos rodados, tanto lateralmente no perfil de solo, como em profundidade, embora em menor magnitude.

De fato, os tratamentos que submeteram o solo a um número a partir de oito passadas do *Forwarder* foram os que ocasionaram os maiores valores de RPC. Entretanto, no tratamento H+4F, a maior parte do perfil apresentou incremento de valores de RPC. Isto evidencia que poucas passadas podem ser responsáveis por grande parte da compactação, o que é relatado por outros autores (SEIXAS; SOUZA, 2007; AMPOORTER et al., 2007).

Considerando-se valores críticos da literatura, valores de RPC acima de 2 MPa são observados em todos os tratamentos, sendo este o limite considerado potencialmente crítico em que pode começar a haver interferência ao desenvolvimento normal radicular das plantas (GREACEN; SANDS, 1980). No entanto, isto é agravado pela observação de haver valores acima de 3 MPa, o que, conforme Whalley et al. (1995) e Zou et al. (2000), é restritivo ao desenvolvimento radicular de espécies florestais.

Com os mapas de isolinhas de incremento da resistência à penetração (Figura 77), pode-se ter uma melhor visualização das zonas afetadas pelo tráfego das máquinas. Outra vez, nota-se que as alterações foram maiores conforme o tráfego foi incrementado.

Poucas passadas das máquinas, de uma passada do *Harvester* até uma do *Harvester* mais quatro do *Forwarder* (H+4F), resultaram em incrementos maiores nas camadas mais superficiais do solo, compreendendo, evidentemente, as regiões abaixo das trilhas de passagem dos rodados. Porém, notam-se efeitos residuais em regiões fora dos rodados e entre rodados. Após muitas passadas, a porção de perfil de solo afetada pelo tráfego é claramente maior, concentrando-se os efeitos mais acentuadamente nas camadas intermediárias do solo.

Resultados semelhantes foram relatados por Cechin (2007), que estudou o efeito do tráfego de *Feller* e *Skidder* sobre dois Argissolos Vermelhos Distróficos, um argiloso e outro areno-argiloso, concluindo que o efeito foi maior após três passadas do *Skidder*. Lima et al. (2008) ao avaliarem o efeito do tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso, concluíram que o tráfego da máquina de corte (*Feller Buncher*) proporcionou menor incremento da RP em relação ao *Skidder*, com menores valores no sentido horizontal do perfil e maiores em profundidade. Ainda, Ampoorter et al. (2010) relatam ter sido maior o efeito de um *Skidder* sobre solo argiloso do que sobre um arenoso.

Deve-se destacar a grande aplicabilidade da RPC *in situ*, pois, além de permitir a obtenção de dados de forma mais fácil e rápida (STOLF, 1991), muitas vezes, é mais sensível que relações massa por volume na detecção de alterações no solo (SILVA, 2003a; ABREU et al., 2004). Contudo, deve-se ter cautela no seu emprego, uma vez que varia em função de outras propriedades como a densidade, umidade, textura, ângulo de atrito e coesão do solo (BUSSCHER, 1990; CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991).

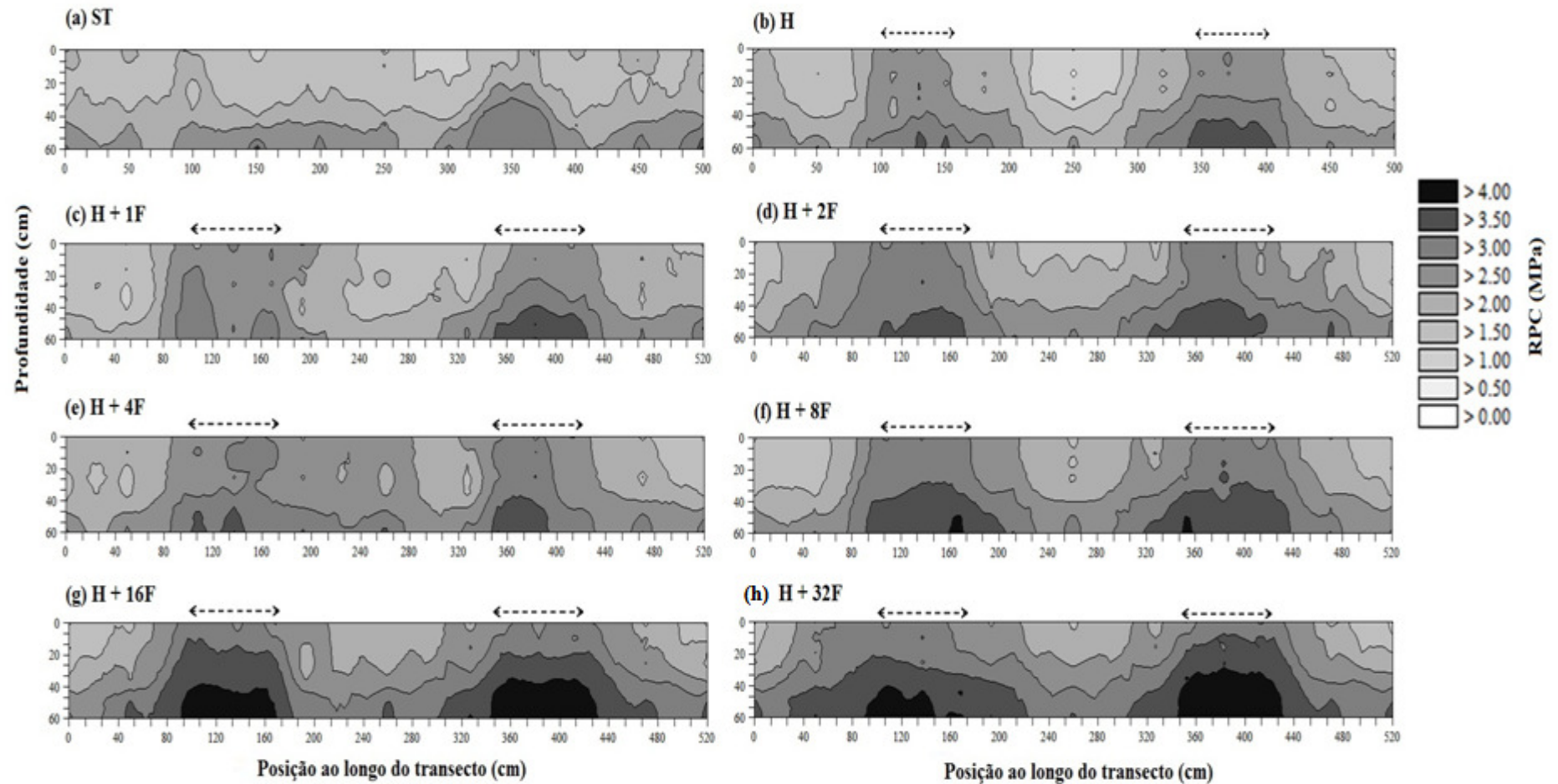


Figura 76 – Efeito dos tratamentos ao longo do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico em isolinhas de RPC; (a) ST = sem tráfego; (b) H = 1 passada *Harvester*; (c) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (d) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (e) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (f) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (g) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (h) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*. A legenda a direita indica os valores de resistência do solo à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados.

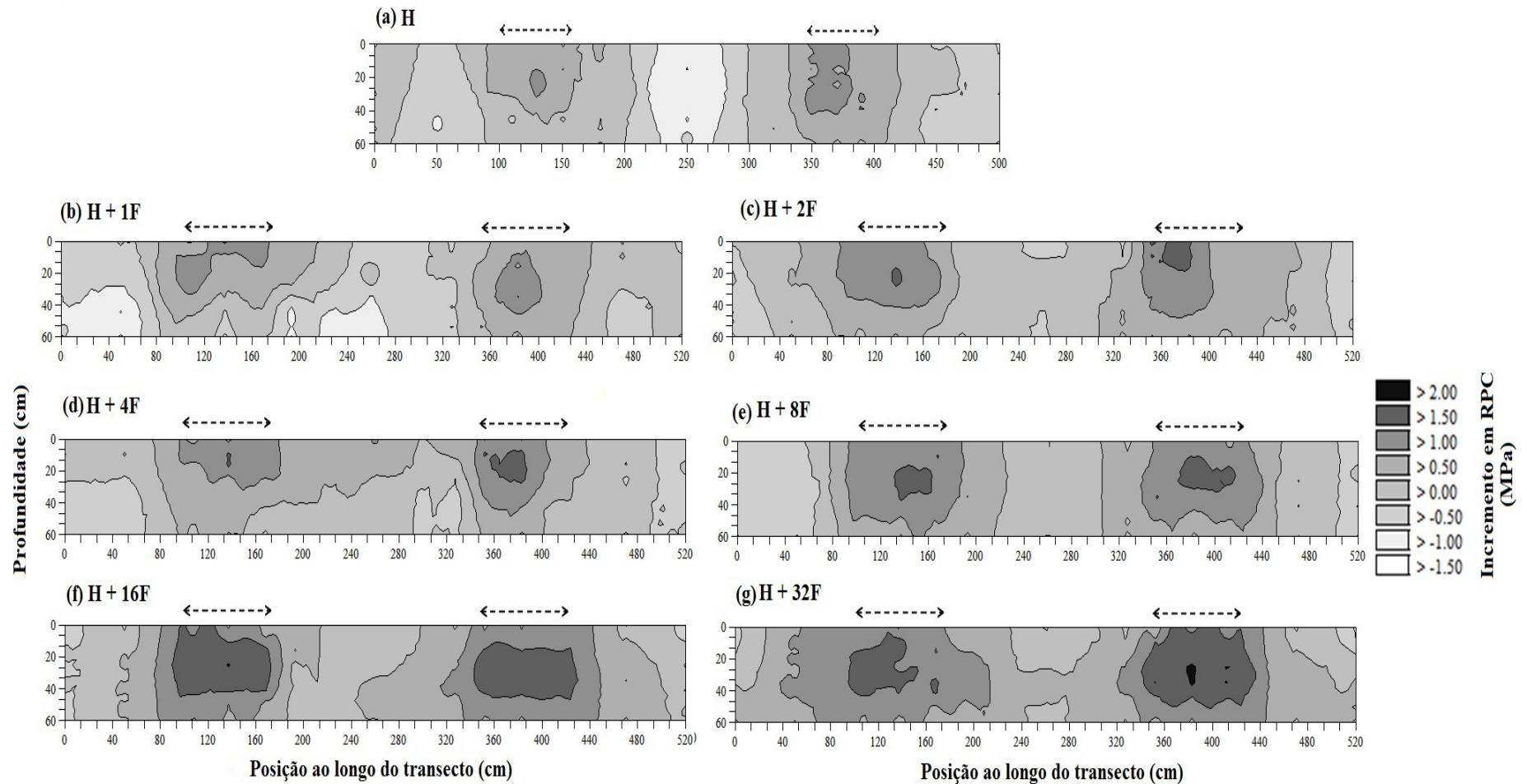


Figura 77 – Efeito dos tratamentos ao longo do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico em isolinhas de incremento de RPC; (a) H = 1 passada *Harvester*; (b) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (c) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (d) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (e) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (f) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (g) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*. A legenda a direita indica os valores de incremento em resistência do solo à penetração. As setas indicam a posição da trilha de passagem dos rodados.

4.3.6. Intervalo hídrico ótimo

A integração das propriedades anteriormente discutidas, densidade do solo, resistência à penetração, umidade na capacidade de campo e umidade no ponto de murcha permanente, além da porosidade de aeração, formam a base do conceito de intervalo hídrico ótimo (LETEY, 1985).

Então, com o intuito de observar o efeito dos tratamentos sobre o salientado indicador de qualidade física do solo, este foi determinado conforme citado no Estudo I (p. 30), sendo representado nas camadas de solo avaliadas (Figura 78), visando a analisar mais claramente o efeito da compactação sobre os limites críticos, que foram definidos como: umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), umidade em que a resistência do solo à penetração é igual a 3 MPa (θ_{RP}) e umidade em que a porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}).

Na condição ST, a faixa de umidade do IHO foi ampla, porém, nota-se que a θ_{RP} foi limite inferior nas camadas de 0 a 10 e 40 a 60 cm, sendo a θ_{CC} o limite superior em todas as profundidades (Figura 78a). Com apenas uma passada do *Harvester* (H), a faixa do IHO é reduzida, principalmente, na camada de 10 a 20 cm, onde a θ_{RP} passa a ser o limite inferior ao invés do θ_{PMP} (Figura 78b). Acumulando somente mais uma passada do *Forwarder* (H+1F) (Figura 78c), novamente, a faixa do IHO é reduzida, sobretudo, dessa vez, na camada de 20 a 40 cm, onde, em decorrência da compactação, o θ_{PMP} deixa de ser o limite inferior passando a ser, então, a θ_{RP} . Aumentando-se o número de passadas das máquinas, houve tendência de redução da faixa do IHO em maior magnitude nas camadas superficiais, até 20 cm, porém, em nenhum momento, os limites superiores e inferiores deixaram de ser a θ_{CC} e θ_{RP} , respectivamente, mostrando que o solo em questão, provavelmente, não terá problemas de aeração com a compactação pelo tráfego de máquinas de colheita florestal.

Ações de manejo também podem ser sugeridas com base nesses resultados, podendo-se ver que o preparo do solo deve ser realizado para descompactação das camadas mais superficiais deste solo, quando este for submetido ao tráfego de máquinas de colheita da madeira, podendo a compactação, em teoria, não proporcionar condições físicas ideais para o crescimento radicular de espécies florestais. O revolvimento de camadas mais profundas, em teoria, não seria fisicamente fundamental para o crescimento de plantas, tendo em vista também, que quanto maior a profundidade do solo a ser revolvida, maior a necessidade de potência dos tratores para a tração e maiores serão os custos operacionais.

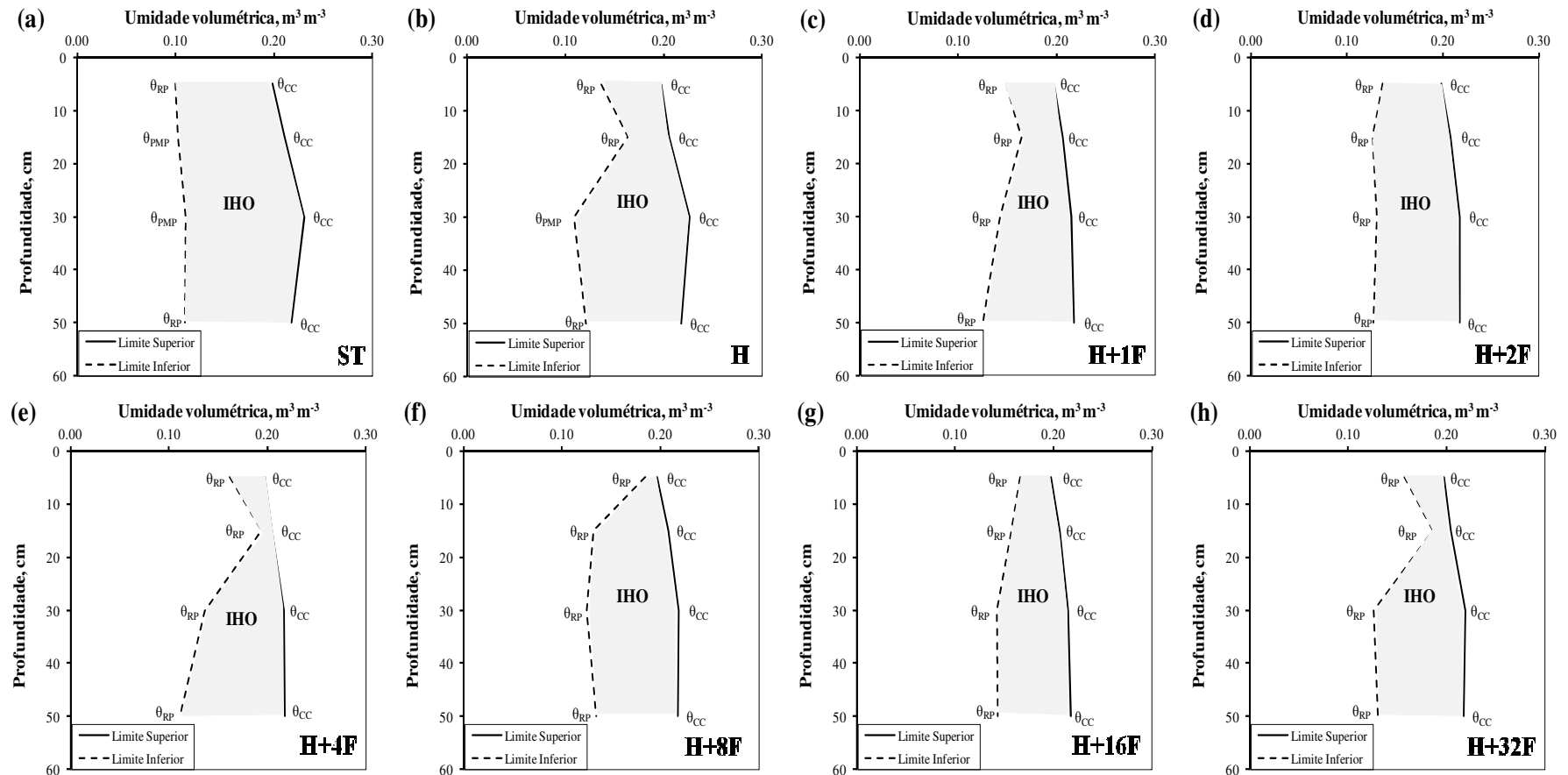


Figura 78 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes intensidades de tráfego nas quatro camadas do perfil do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; (a) ST = sem tráfego; (b) H = 1 passada *Harvester*; (c) H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; (d) H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; (e) H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; (f) H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; (g) H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; (h) H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*; θ_{PA} = umidade em que a porosidade de aeração é igual a 0,1 m³ m⁻³; θ_{CC} = umidade na capacidade de campo; θ_{RP} = umidade em que a resistência do solo à penetração é igual a 3 MPa; θ_{PMP} = umidade no ponto de murcha permanente.

4.3.7. Pressão de pré-consolidação, índice de compressão e comportamento compressivo do solo

Os valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) na condição de campo não apresentaram diferenças estatísticas, embora se possa notar que o sucessivo tráfego tendeu a aumentar a σ_p , principalmente até 20 cm de profundidade. Salienta-se, que, nessa condição, a umidade média do solo era próxima ao ponto de murcha permanente ($0,074 \text{ kg kg}^{-1}$), ou seja, o solo estava em condição seca (Tabela 31).

Na tensão de 10 kPa, na camada de 0 a 10 cm, não houve diferenças estatísticas, contudo, também se pode notar aumento da σ_p com o tráfego. Na camada de 10 a 20 cm, somente após uma passada do *Harvester* mais quatro do *Forwarder*, tais ações resultaram em diferença significativa em comparação com a condição inicial do solo (ST), aumentando a σ_p em torno de 140 %. Na camada de 20 a 40 cm, apesar de ter havido diferença estatística entre os tratamentos, nenhum diferiu da condição ST. Na camada de solo mais profunda (40 a 60 cm), a ação do tráfego foi capaz de alterar significativamente a σ_p somente após uma passada do *Harvester* associada a dezesseis passadas do *Forwarder* (H+16F), demonstrando mais uma vez, o quanto o impacto sobre o solo pelo tráfego de máquinas pode ser agravado em função da repetição de passadas (Tabela 31).

Na tensão de 100 kPa, da mesma forma que na condição de campo, não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos em nenhuma das camadas de solo avaliadas. Contudo, de maneira semelhante, houve tendência de aumento da σ_p com o aumento do número de passadas das máquinas de colheita da madeira (Tabela 31).

O fato de somente ter havido diferenças estatísticas na tensão de 10 kPa pode ser explicado em função da σ_p deste solo ter sido mais dependente da umidade do que do estado de compactação, como foi verificado no Estudo I (p. 95). Na condição de campo, a umidade, como já citado, foi de aproximadamente, $0,074 \text{ kg kg}^{-1}$ e a σ_p média de 187,7 kPa; na tensão de 100 kPa foi de $0,089 \text{ kg kg}^{-1}$ e a σ_p média de 157,4 kPa; e na tensão de 10 kPa, correspondente a capacidade de campo, foi de $0,125 \text{ kg kg}^{-1}$ e a σ_p média de 103,8 kPa. Então, pode-se ver que da condição de campo (solo seco) para a tensão de 100 kPa, tanto a umidade e σ_p não foram tão distintas, porém dessas condições para a tensão de 10 kPa, a umidade e σ_p foram mais distintas, salientando, mais uma vez, o fato do comportamento mecânico do solo ser afetado diretamente pela condição de umidade do solo (DIAS JÚNIOR et al., 2004).

Diante disso, pode-se pressupor que a compactação do solo causada pelo tráfego do *Harvester* e do *Forwarder* seria bem maior, caso o solo estivesse mais úmido, o que concorda

com os resultados encontrados por McNabb et al. (2001), os quais relatam que a compactação de solos de diversas texturas foi maior quando estes se encontravam em condição de umidade na capacidade de campo ou mais úmidos. Rollerson (1990), Nambiar (1996), Seixas e Oliveira Júnior (2001), Dias Júnior et al. (2005), Wood et al. (2006) e Sampietro (2010) relatam e discutem resultados semelhantes; isto é, demonstram que as operações de colheita da madeira efetuada em solos secos causam menor compactação em comparação a solos úmidos.

Tabela 31 – Valores médios de pressão de pré-consolidação (\pm desvio padrão) na umidade durante os ensaios de tráfego (condição de campo) e nas tensões de água de 10 e 100 kPa, nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Camada (cm)	Valor <i>F</i>	Pressão de pré-consolidação (kPa)							
		Tratamento							
		ST	H	H+1F	H+2F	H+4F	H+8F	H+16F	H+32F
Condição de campo									
0 – 10	0,99ns	100,7 (\pm 37,8)	128,6 (\pm 130,1)	193,4 (\pm 11,7)	199,0 (\pm 108,3)	188,8 (\pm 39,9)	263,7 (\pm 171,2)	237,5 (\pm 42,1)	222,8 (\pm 83,7)
10 – 20	2,18ns	149,3 (\pm 64,9)	143,5 (\pm 66,7)	195,3 (\pm 10,3)	341,2 (\pm 36,4)	235,6 (\pm 161,8)	159,0 (\pm 10,6)	110,1 (\pm 21,5)	144,8 (\pm 135,3)
20 – 40	2,40ns	208,9 (\pm 116,3)	280,4 (\pm 100,9)	129,4 (\pm 99,9)	93,1 (\pm 19,7)	99,8 (\pm 50,3)	189,8 (\pm 102,0)	199,7 (\pm 66,5)	315,7 (\pm 82,8)
40 – 60	0,67ns	199,0 (\pm 56,3)	187,1 (\pm 100,3)	152,1 (\pm 42,6)	136,7 (\pm 84,7)	168,1 (\pm 96,5)	165,8 (\pm 71,7)	284,0 (\pm 221,1)	182,1 (\pm 53,3)
Tensão de 10 kPa									
0 – 10	2,10ns	76,1 (\pm 32,5)	118,2 (\pm 22,0)	123,3 (\pm 17,7)	116,0 (\pm 23,9)	119,1 (\pm 6,8)	115,7 (\pm 8,4)	146,3 (\pm 22,7)	104,6 (\pm 38,7)
10 – 20	2,97*	57,2 b (\pm 14,5)	79,2 ab (\pm 51,7)	101,4 ab (\pm 24,2)	71,8 ab (\pm 12,5)	136,0 a (\pm 36,5)	102,2 ab (\pm 14,4)	106,4 ab (\pm 8,1)	86,5 ab (\pm 3,9)
20 – 40	5,89**	112,6 ab (\pm 2,8)	142,6 a (\pm 25,2)	61,7 b (\pm 36,6)	127,5 a (\pm 2,4)	142,5 a (\pm 17,7)	96,9 ab (\pm 11,1)	89,3 ab (\pm 36,1)	121,5 a (\pm 2,4)
40 – 60	6,11**	69,8 b (\pm 14,3)	128,7 ab (\pm 43,1)	99,1 ab (\pm 43,1)	66,3 b (\pm 3,7)	70,3 b (\pm 2,1)	67,3 b (\pm 2,6)	160,0 a (\pm 15,5)	104,2 ab (\pm 25,6)
Tensão de 100 kPa									
0 – 10	1,30ns	75,5 (\pm 27,2)	108,7 (\pm 102,1)	118,9 (\pm 88,9)	133,4 (\pm 78,9)	133,7 (\pm 53,0)	159,2 (\pm 73,6)	313,2 (\pm 249,7)	158,1 (\pm 29,6)
10 – 20	1,69ns	30,4 (\pm 1,4)	213,8 (\pm 47,9)	80,3 (\pm 56,9)	109,6 (\pm 19,4)	184,6 (\pm 31,2)	141,3 (\pm 17,7)	253,9 (\pm 263,6)	190,2 (\pm 66,2)
20 – 40	1,74ns	175,1 (\pm 77,6)	211,1 (\pm 17,7)	119,1 (\pm 32,5)	122,7 (\pm 72,6)	217,5 (\pm 55,6)	211,8 (\pm 20,6)	201,9 (\pm 91,4)	236,6 (\pm 1,5)
40 – 60	2,37ns	60,3 (\pm 17,9)	135,1 (\pm 89,5)	191,7 (\pm 90,1)	96,5 (\pm 19,3)	236,7 (\pm 84,7)	116,7 (\pm 26,9)	176,3 (\pm 107,2)	121,1 (\pm 34,4)

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*.

A ocorrência de poucas diferenças estatísticas pode ter sido devido ao solo, de certa forma, ter aguentado as pressões advindas do tráfego, uma vez que, durante as simulações de tráfego (condição de campo), a capacidade de suporte na condição inicial do solo era de 125 e 204 kPa, dos 0 a 20 cm e 20 a 60 cm de profundidade, respectivamente. Assim, como o *Harvester* exerceu uma pressão de 75 kPa e o *Forwarder*, após passada, exerceu uma pressão média de 84 kPa, estas não foram suficientes para superar a pressão máxima que o solo havia aguentado no passado, lembrando que essa foi a segunda rotação de colheita do eucalipto, sendo a colheita da primeira rotação feita também de forma mecanizada.

Contudo, apesar da capacidade de suporte não ter sido superada, ainda assim houve algumas alterações físicas no solo e, com o aumento do número de passadas, essas alterações ganharam maior magnitude, justificando o comportamento mecânico do solo, uma vez que isto é dinâmico, refletindo as pressões externas aplicadas. Quando são aplicadas pressões externas superiores à capacidade de suporte do solo, ocorre a aproximação das partículas, havendo a redução do tamanho médio dos poros. Como poros de menor dimensão tendem a ser menos propensos às forças compactantes, estes levam a uma maior resistência do solo e, dessa forma, a capacidade de suporte (pressão de pré-consolidação) é aumentada, o que, parcialmente, protege o solo de compactação adicional (WILLIAMSON; NEILSEN, 2000). No caso do solo sofrer pressões advindas de tráfego menores que a pressão de pré-consolidação, este reage de forma elástica e não há compactação adicional; ou seja, somente haverá compactação adicional do solo, caso as pressões impostas sejam superiores à pressão de pré-consolidação e, então, o solo apresentará comportamento plástico, havendo deformação e alteração de suas propriedades físicas (HORN et al., 2007).

Essas explicações também se aplicam para justificar o comportamento do índice de compressão (IC). Na condição de campo em nenhuma das camadas houve diferenças estatísticas (Tabela 32). Na tensão de 10 kPa, na camada de 0 a 10 cm também não houveram diferenças significativas, mesmo havendo tendência de diminuição dos valores de IC ocasionado pelo tráfego das máquinas. Na camada de 10 a 20 cm, já ocorreram diferenças significativas em relação a ST a partir de H+4F, exceto para H+8F. Na camada de 20 a 40 cm, foram somente os tratamentos H+1F, H+8F e H+16F que diferiram significativamente de ST. Enquanto na camada mais profunda, embora o valor F da análise de variância tenha sido significativo a 5 %, não houve diferenças entre os tratamentos (Tabela 32). Por fim, na tensão de 100 kPa, somente houve diferenças estatísticas na camada de 20 a 40 cm, sendo que todos os tratamentos, exceto H+32F, diferiram de ST, demonstrando, também, tendência de redução

dos valores de IC com o tráfego das máquinas, podendo ser visto comportamento semelhante nas outras camadas, apesar de não ter havido diferenças significativas nestas (Tabela 32).

Tabela 32 – Valores médios de índice de compressão (\pm desvio padrão) na umidade durante os ensaios de tráfego (condição de campo) e nas tensões de água de 10 e 100 kPa nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Camada (cm)	Valor F	Índice de compressão							
		Tratamento							
		ST	H	H+1F	H+2F	H+4F	H+8F	H+16F	H+32F
Condição de campo									
0 – 10	0,56ns	0,123 (\pm 0,051)	0,074 (\pm 0,065)	0,103 (\pm 0,011)	0,117 (\pm 0,024)	0,089 (\pm 0,028)	0,123 (\pm 0,040)	0,103 (\pm 0,006)	0,121 (\pm 0,054)
10 – 20	0,91ns	0,138 (\pm 0,028)	0,063 (\pm 0,039)	0,101 (\pm 0,003)	0,155 (\pm 0,134)	0,081 (\pm 0,033)	0,081 (\pm 0,072)	0,080 (\pm 0,003)	0,088 (\pm 0,021)
20 – 40	2,11ns	0,054 (\pm 0,067)	0,111 (\pm 0,028)	0,086 (\pm 0,046)	0,131 (\pm 0,110)	0,071 (\pm 0,049)	0,104 (\pm 0,032)	0,149 (\pm 0,036)	0,181 (\pm 0,008)
40 – 60	1,31ns	0,090 (\pm 0,017)	0,206 (\pm 0,122)	0,174 (\pm 0,151)	0,184 (\pm 0,139)	0,216 (\pm 0,054)	0,213 (\pm 0,032)	0,083 (\pm 0,076)	0,233 (\pm 0,097)
Tensão de 10 kPa									
0 – 10	1,02ns	0,162 (\pm 0,059)	0,122 (\pm 0,008)	0,141 (\pm 0,018)	0,147 (\pm 0,047)	0,133 (\pm 0,003)	0,150 (\pm 0,039)	0,108 (\pm 0,010)	0,126 (\pm 0,013)
10 – 20	5,76**	0,185 a (\pm 0,037)	0,135 abc (\pm 0,019)	0,139 abc (\pm 0,015)	0,159 ab (\pm 0,030)	0,102 c (\pm 0,001)	0,151 abc (\pm 0,009)	0,113 bc (\pm 0,023)	0,117 bc (\pm 0,001)
20 – 40	14,03**	0,265 a (\pm 0,002)	0,245 ab (\pm 0,023)	0,135 c (\pm 0,003)	0,233 ab (\pm 0,001)	0,231 ab (\pm 0,020)	0,193 b (\pm 0,031)	0,207 b (\pm 0,022)	0,230 ab (\pm 0,001)
40 – 60	2,89*	0,265 a (\pm 0,014)	0,269 a (\pm 0,020)	0,240 a (\pm 0,023)	0,241 a (\pm 0,005)	0,247 a (\pm 0,004)	0,252 a (\pm 0,001)	0,265 a (\pm 0,007)	0,243 a (\pm 0,013)
Tensão de 100 kPa									
0 – 10	1,34ns	0,134 (\pm 0,075)	0,102 (\pm 0,089)	0,104 (\pm 0,045)	0,087 (\pm 0,025)	0,150 (\pm 0,064)	0,136 (\pm 0,041)	0,033 (\pm 0,041)	0,098 (\pm 0,024)
10 – 20	1,11ns	0,129 (\pm 0,007)	0,115 (\pm 0,017)	0,107 (\pm 0,021)	0,127 (\pm 0,014)	0,135 (\pm 0,011)	0,100 (\pm 0,002)	0,075 (\pm 0,085)	0,100 (\pm 0,017)
20 – 40	14,91**	0,300 a (\pm 0,025)	0,166 cd (\pm 0,005)	0,196 bcd (\pm 0,053)	0,167 cd (\pm 0,017)	0,154 d (\pm 0,008)	0,174 cd (\pm 0,004)	0,219 bc (\pm 0,025)	0,246 ab (\pm 0,003)
40 – 60	0,61ns	0,223 (\pm 0,033)	0,183 (\pm 0,092)	0,194 (\pm 0,025)	0,181 (\pm 0,012)	0,239 (\pm 0,050)	0,225 (\pm 0,051)	0,186 (\pm 0,081)	0,242 (\pm 0,040)

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*.

Para representar o efeito do tráfego sobre o comportamento compressivo do solo, foi escolhida a tensão de água de 10 kPa (Figura 79), uma vez que foi nessa tensão que foram verificadas as maiores alterações de σ_p e IC (Tabelas 31 e 32), além dessa tensão ser equivalente à umidade na capacidade de campo, a qual é considerada a condição em que o solo se encontra com menor resistência à compactação (SOANE et al., 1981; REICHERT et

al., 2007; REICHERT et al., 2009; REICHERT et al., 2010), estando próxima da U_{OC} para este solo (Figura 58, p. 115).

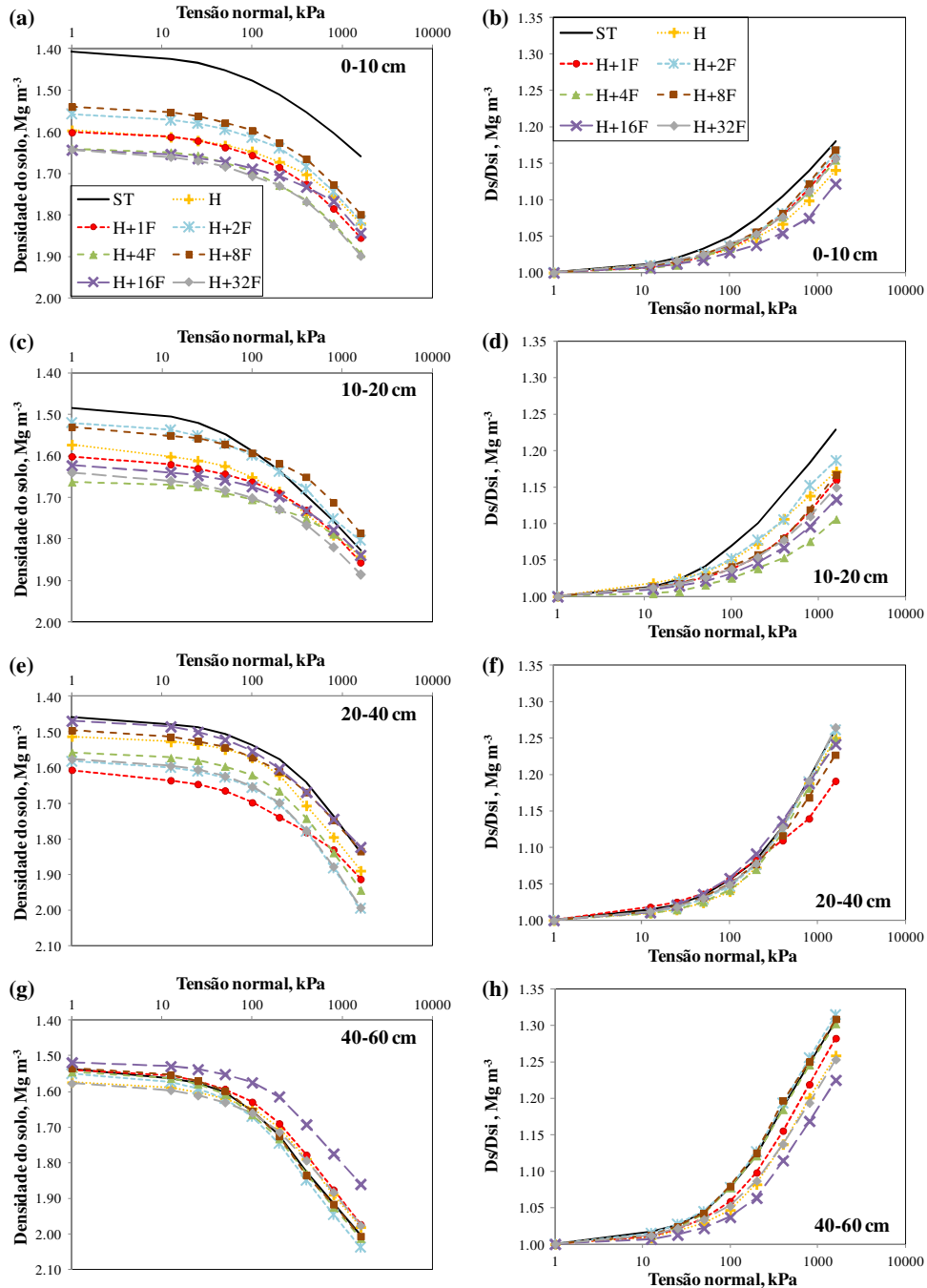


Figura 79 – Curvas de compressão (a, c, e, g) e curvas de compressão normalizadas (b, d, f, h) na tensão de água de 10 kPa em função das diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*.

Na camada de 0 a 10 cm, o comportamento compressivo do solo em função das condições de tráfego é semelhante, exceto H+16F, sendo acima da tensão normal (σ) de 100 kPa que as curvas de compressão começam a sair da região elástica, passando para a região de deformação plástica. A condição de ST resultou em maior deformação do solo, havendo maior incremento em D_s , com base na curva de compressão normalizada, enquanto a condição H+16F, além de apresentar um comportamento compressivo diferente dos outros tratamentos, foi a condição em que houve menor deformação do solo. Na camada de 10 a 20 cm, a partir da σ de 100 kPa, a curva da condição ST começou a entrar na região de deformação plástica, sendo que após a σ de 200 até 1600 kPa, resultou em valor de D_s próximo às condições de tráfego e, dessa forma, apresentando uma deformação do solo mais expressiva. Na camada de 20 a 40 cm, o comportamento compressivo entre os tratamentos foi semelhante, exceto H+1F, sendo o mesmo em relação à deformação e incremento de D_s . Na camada de 40 a 60 cm, as curvas começaram a entrar na região plástica em torno da σ de 100 kPa, sendo o comportamento compressivo semelhante entre os tratamentos, exceto H+16F, que resultou em menor deformação do solo (Figura 79).

4.3.8. Grau de compactação do solo

Na literatura, são citadas três formas predominantes para a obtenção da densidade referência (D_{SRef}), a qual é utilizada para se calcular o grau de compactação do solo (GC), que é a relação entre a densidade do solo atual, ou em determinada condição, com algum estado referência ou de compactação máxima (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000), a saber: pelo ensaio de Proctor utilizando amostras de solo com estrutura deformada (CARTER, 1990; SILVA, et al., 1994; SMITH et al., 1997a,b; TORRES; SARAIVA, 1999; KRZIC et al., 2004; BEUTLER et al., 2005; KLEIN, 2008; REICHERT et al., 2010); pelo ensaio de compressão uniaxial, aplicando uma tensão normal de 200 kPa, utilizando amostras de solo com estrutura deformada (HÅKANSSON, 1990; SILVA et al., 1997; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000); e, também, pelo ensaio de compressão uniaxial, contudo, aplicando uma tensão normal de 1600 kPa e utilizando amostras de solo com estrutura preservada (SUZUKI, 2005; SUZUKI et al., 2008; SUZUKI, 2008).

Diante disso e, também, tendo em vista que para solos florestais ainda são escassas as informações na literatura, no presente trabalho, foi calculado o GC, testando como densidade referência a D_{SMax} advinda do ensaio de Proctor Normal e as densidades obtidas após as tensões normais de 400 kPa ($D_{SRef400}$), 800 kPa ($D_{SRef800}$) e 1600 kPa ($D_{SRef1600}$), advindas do

ensaio de compressão uniaxial, sendo essas tensões normais escolhidas com base nas pressões aplicadas pelas máquinas de colheita de madeira sobre o solo (LEBERT; HORN, 1991; SILVA et al., 2000; HORN et al., 2004), uma vez que o uso de tensões menores poderia resultar em baixos valores de densidade de referência, e, conseqüentemente, em elevados valores de grau de compactação, o que significa a superestimativa deste parâmetro (SUZUKI, 2008).

Por meio da Tabela 33, pode-se ver que os valores de GC foram maiores utilizando a $D_{S_{Ref400}}$, seguido da $D_{S_{Ref800}}$, enquanto os valores de GC com base na $D_{S_{MAX}}$ e $D_{S_{Ref1600}}$ não apresentaram acentuadas diferenças. Assim, comparando os resultados obtidos através deste estudo com os resultados da relação grau de compactação e densidade crítica do solo discutidos no Estudo I (p. 83), verifica-se, em geral, que utilizando tanto a $D_{S_{Ref400}}$ como a $D_{S_{Ref800}}$ para o cálculo do GC, houve superestimativa do parâmetro, enquanto, tanto o uso da $D_{S_{MAX}}$ como da $D_{S_{Ref1600}}$ foram melhores para o cálculo do GC. Desta forma, recomenda-se o uso do ensaio de Proctor Normal ou o uso do ensaio de compressão uniaxial com a aplicação da tensão de 1600 kPa para obtenção da $D_{S_{Ref}}$ para solos florestais, sendo esta última forma de obter a $D_{S_{Ref}}$ corroborado por Suzuki (2008).

Novamente, em análise dos dados da Tabela 33, mas desta vez para verificar os efeitos do tráfego, na camada de 0 a 10 cm, houve diferença significativa em relação a condição ST, a partir de uma passada do *Harvester* mais quatro do *Forwarder* (H+4F), sendo o maior GC atingido na condição H+8F, para todas as $D_{S_{Ref}}$. Na camada de 10 a 20 cm, a diferença significativa já ocorreu após H, sendo o maior GC após H+4F. Na camada de 20 a 40 cm, quase todas as condições de tráfego resultaram em diferença significativa em relação a ST. Enquanto na camada de 40 a 60 cm, somente H+16F resultou em diferença significativa. Os valores de GC com base na $D_{S_{MAX}}$, sobretudo nas camadas superficiais, muitas vezes, ficaram dentro da faixa de 85 a 90 % de GC, sendo essa a faixa de GC correspondente à densidade crítica do solo calculada com RP crítica de 2 MPa ($D_{S_cIHO_{RP2MPa}}$). Em relação a faixa de 90 a 100 % de GC, que é correspondente a $D_{S_cIHO_{RP3MPa}}$, em nenhuma situação os valores se encontraram nela, demonstrando, outra vez, que, embora os impactos do tráfego tenham sido significativos, ainda não chegaram, teoricamente, na condição em que haverá restrições do crescimento radicular de espécies florestais, entretanto, deve haver precaução em relação ao tráfego e manejo futuro neste solo, para que tal limite não seja atingido.

Tabela 33 – Valores médios de grau de compactação (\pm desvio padrão) utilizando como densidade de referência a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio Proctor Normal ($D_{S_{MAX}}$) e as densidades obtidas após a aplicação da tensão normal de 400 kPa ($D_{S_{Ref400}}$), 800 kPa ($D_{S_{Ref800}}$) e 1600 kPa ($D_{S_{Ref1600}}$) no ensaio de compressão uniaxial, para as diferentes intensidades de tráfego e posições nas quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Camada (cm)	Valor <i>F</i>	Grau de compactação (%)							
		Tratamento							
		ST	H	H+1F	H+2F	H+4F	H+8F	H+16F	H+32F
Densidade de referência: Densidade do solo máxima ($D_{S_{MAX}}$)									
0 – 10	4,08**	78,1 b ($\pm 7,8$)	83,7 ab ($\pm 4,9$)	85,4 ab ($\pm 3,9$)	83,7 ab ($\pm 3,2$)	86,8 a ($\pm 3,5$)	90,0 a ($\pm 4,8$)	87,4 a ($\pm 3,2$)	86,2 ab ($\pm 2,7$)
10 – 20	5,49**	79,3 b ($\pm 1,6$)	85,7 a ($\pm 6,0$)	85,8 a ($\pm 5,0$)	82,5 ab ($\pm 1,7$)	87,9 a ($\pm 2,3$)	83,2 ab ($\pm 1,8$)	85,2 a ($\pm 2,4$)	87,5 a ($\pm 3,0$)
20 – 40	5,72**	78,9 c ($\pm 2,9$)	80,0 bc ($\pm 3,3$)	84,7 a ($\pm 4,1$)	83,7 ab ($\pm 1,2$)	83,9 ab ($\pm 3,1$)	83,0 abc ($\pm 2,8$)	84,7 a ($\pm 4,3$)	83,3 ab ($\pm 1,5$)
40 – 60	3,72**	79,7 b ($\pm 2,4$)	82,9 ab ($\pm 4,4$)	83,9 ab ($\pm 2,7$)	84,2 ab ($\pm 4,8$)	80,5 b ($\pm 3,6$)	86,3 ab ($\pm 4,2$)	87,9 a ($\pm 5,4$)	85,2 ab ($\pm 4,7$)
Densidade de referência: Densidade após tensão normal de 400 kPa ($D_{S_{Ref400}}$)									
0 – 10	4,10**	84,0 b ($\pm 8,4$)	90,0 ab ($\pm 5,3$)	91,8 ab ($\pm 4,2$)	90,1 ab ($\pm 3,5$)	93,3 a ($\pm 3,8$)	96,8 a ($\pm 5,2$)	94,0 a ($\pm 3,4$)	92,7 ab ($\pm 2,9$)
10 – 20	5,44**	85,3 b ($\pm 1,7$)	92,2 a ($\pm 6,5$)	92,4 a ($\pm 5,4$)	88,8 ab ($\pm 1,8$)	94,6 a ($\pm 2,5$)	89,5 ab ($\pm 2,0$)	91,7 a ($\pm 2,6$)	94,1 a ($\pm 3,2$)
20 – 40	5,79**	83,3 c ($\pm 3,0$)	84,5 bc ($\pm 3,4$)	89,5 a ($\pm 4,3$)	88,4 ab ($\pm 1,3$)	88,6 ab ($\pm 3,2$)	87,7 abc ($\pm 3,0$)	89,4 a ($\pm 4,5$)	88,0 ab ($\pm 1,5$)
40 – 60	3,70**	78,8 b ($\pm 2,4$)	81,9 ab ($\pm 4,4$)	83,0 ab ($\pm 2,7$)	83,2 ab ($\pm 4,8$)	79,6 b ($\pm 3,6$)	85,3 ab ($\pm 4,2$)	86,9 a ($\pm 5,4$)	84,3 ab ($\pm 4,6$)
Densidade de referência: Densidade após tensão normal de 800 kPa ($D_{S_{Ref800}}$)									
0 – 10	4,09**	81,4 b ($\pm 8,2$)	87,2 ab ($\pm 5,2$)	89,0 ab ($\pm 4,0$)	87,3 ab ($\pm 3,4$)	90,4 a ($\pm 3,7$)	93,9 a ($\pm 5,0$)	91,1 a ($\pm 3,3$)	89,8 ab ($\pm 2,8$)
10 – 20	5,49**	82,7 b ($\pm 1,7$)	89,4 a ($\pm 6,3$)	89,5 a ($\pm 5,2$)	86,0 ab ($\pm 1,7$)	91,7 a ($\pm 2,4$)	86,8 ab ($\pm 1,9$)	88,9 a ($\pm 2,5$)	91,3 a ($\pm 3,1$)
20 – 40	5,76**	79,3 c ($\pm 2,9$)	80,5 bc ($\pm 3,3$)	85,2 a ($\pm 4,1$)	84,2 ab ($\pm 1,2$)	84,4 ab ($\pm 3,1$)	83,5 abc ($\pm 2,8$)	85,2 a ($\pm 4,3$)	83,8 ab ($\pm 1,5$)
40 – 60	3,67**	75,0 b ($\pm 2,3$)	78,0 ab ($\pm 4,1$)	79,0 ab ($\pm 2,5$)	79,2 ab ($\pm 4,5$)	75,7 b ($\pm 3,4$)	81,2 ab ($\pm 3,9$)	82,7 a ($\pm 5,1$)	80,2 ab ($\pm 4,4$)
Densidade de referência: Densidade após tensão normal de 1600 kPa ($D_{S_{Ref1600}}$)									
0 – 10	4,07**	78,3 b ($\pm 7,9$)	83,9 ab ($\pm 5,0$)	85,6 ab ($\pm 3,9$)	84,0 ab ($\pm 3,2$)	87,0 a ($\pm 3,5$)	90,3 a ($\pm 4,8$)	87,6 a ($\pm 3,2$)	86,4 ab ($\pm 2,7$)
10 – 20	5,47**	79,6 b ($\pm 1,6$)	86,0 a ($\pm 6,0$)	86,1 a ($\pm 5,0$)	82,8 ab ($\pm 1,7$)	88,2 a ($\pm 2,3$)	83,5 ab ($\pm 1,8$)	85,5 a ($\pm 2,4$)	87,8 a ($\pm 3,0$)
20 – 40	5,71**	75,3 c ($\pm 2,7$)	76,4 bc ($\pm 3,1$)	80,9 a ($\pm 3,9$)	79,9 ab ($\pm 1,1$)	80,1 ab ($\pm 2,9$)	79,3 abc ($\pm 2,7$)	80,8 a ($\pm 4,1$)	79,5 ab ($\pm 1,4$)
40 – 60	3,72**	71,6 b ($\pm 2,2$)	74,4 ab ($\pm 3,9$)	75,4 ab ($\pm 2,4$)	75,6 ab ($\pm 4,3$)	72,3 b ($\pm 3,2$)	77,4 ab ($\pm 3,8$)	78,9 a ($\pm 4,8$)	76,5 ab ($\pm 4,2$)

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H = 1 passada *Harvester*; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+2F = 1 passada do *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+8F = 1 passada do *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*; H+32F = 1 passada do *Harvester* + 32 passadas do *Forwarder*.

4.3.8. Resistência do solo ao cisalhamento

As envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento em função de diferentes intensidades de tráfego de máquinas de colheita da madeira são apresentadas na Figura 80.

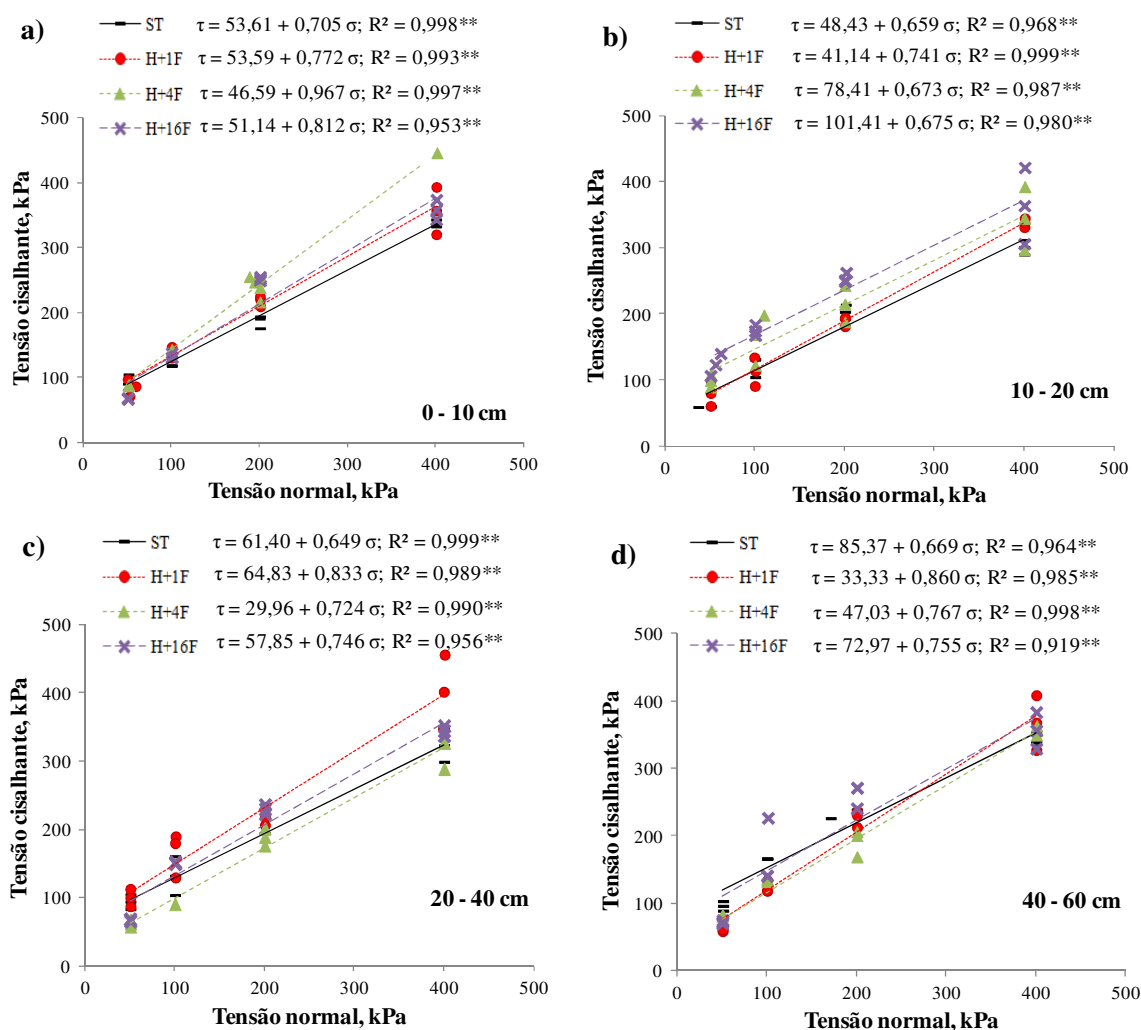


Figura 80 – Envoltórias de cisalhamento em função das diferentes intensidades de tráfego para as camadas de 0 a 10 cm (a), 10 a 20 cm (b), 20 a 40 cm (c) e 40 a 60 cm (d) de profundidade do Cambissolo Háplico Tb Distrófico; ST = sem tráfego; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*.

Na camada de 0 a 10 cm (Figura 80a) pode-se ver que o tráfego das máquinas aumentou a resistência do solo ao cisalhamento, alterando, inclusive, a inclinação da reta de cisalhamento, sendo maior no tratamento H+4F. Na camada de 10 a 20 cm (Figura 80b), ocorrência semelhante foi observada, porém, dessa vez foi o intercepto da reta que foi

alterado pelo tráfego, embora, a inclinação tenha sido pouco alterada, sendo a maior alteração da resistência ao cisalhamento causada pela maior intensidade de tráfego avaliada (H+16F). Na camada de 20 a 40 cm, a inclinação da reta foi mais alterada do que o intercepto, sendo a condição H+1F a que resultou em maior resistência do solo (Figura 80c). Já na camada de 40 a 60 cm, aparentemente, não houve efeito considerável do tráfego sobre a resistência ao cisalhamento do solo (Figura 80d).

O intercepto da reta de cisalhamento representa o valor de coesão do solo (c), enquanto a inclinação representa o ângulo de atrito interno (ϕ), segundo a equação de Coulomb (LAMBE, 1951). A comparação estatística dos valores desses parâmetros obtidos com as diferentes intensidades de tráfego é apresentada na Tabela 34. Na camada de 0 a 10 cm, a c não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, enquanto o ϕ foi diferente na condição H+4F, mostrando a alteração desse parâmetro pelo tráfego. Na camada de 10 a 20 cm, embora tenha havido tendência de aumento do valor de c pelo tráfego das máquinas, nenhuma situação de tráfego diferiu da condição inicial do solo (ST), enquanto que para ϕ não foram detectadas diferenças estatísticas. Na camada de 20 a 40 cm, da mesma forma, nenhum tratamento de tráfego diferiu de ST, não havendo diferenças significativas em relação ao ϕ também. Na camada de solo mais profunda avaliada, a ação do tráfego não foi capaz de incrementar a c , sendo os valores significativamente menores nos tratamentos H+1F e H+4F em comparação à ST. Em relação ao ϕ , somente houve diferença ocasionada por H+1F (Tabela 34).

Tabela 34 – Valores médios de coesão e ângulo de atrito interno (\pm desvio padrão) nas diferentes intensidades de tráfego para as quatro camadas de profundidade avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Tratamento	Coesão (kPa)				Ângulo de atrito interno (ϕ)			
	Camada (cm)				Camada (cm)			
	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	0 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60
ST	53,6 ($\pm 10,2$)	48,4 ab ($\pm 9,3$)	61,4 ab ($\pm 20,7$)	85,4 a ($\pm 3,3$)	35,2 b ($\pm 0,7$)	33,4 ($\pm 0,9$)	32,9 ($\pm 2,6$)	33,8 b ($\pm 0,9$)
H+1F	53,6 ($\pm 10,4$)	41,1 b ($\pm 22,6$)	64,8 a ($\pm 18,4$)	33,3 b ($\pm 12,8$)	37,6 b ($\pm 3,3$)	36,5 ($\pm 2,6$)	39,6 ($\pm 4,1$)	40,5 a ($\pm 4,1$)
H+4F	46,6 ($\pm 4,8$)	78,4 ab ($\pm 13,7$)	30,0 b ($\pm 3,8$)	47,0 b ($\pm 2,0$)	44,0 a ($\pm 1,6$)	33,8 ($\pm 3,4$)	35,9 ($\pm 2,0$)	37,5 ab ($\pm 0,7$)
H+16F	51,1 ($\pm 4,5$)	101,4 a ($\pm 24,0$)	57,8 ab ($\pm 4,7$)	73,0 a ($\pm 14,1$)	39,1 b ($\pm 1,5$)	33,6 ($\pm 7,7$)	36,7 ($\pm 0,9$)	37,0 ab ($\pm 1,4$)
Valor F	0,45 ns	5,27*	5,93*	23,33**	17,86**	0,42 ns	4,66 ns	6,19*

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância; *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo; ST = sem tráfego; H+1F = 1 passada do *Harvester* + 1 passada do *Forwarder*; H+4F = 1 passada do *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder*; H+16F = 1 passada do *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder*.

Como o tráfego de máquinas provoca tensões em dois sentidos no solo, a resistência ao cisalhamento pode ser mais precisa na detecção de alterações estruturais, uma vez que, quando se avalia a dinâmica do tráfego de máquinas, os parâmetros obtidos pela envoltória de resistência ao cisalhamento, por serem caracterizados pela combinação de forças tangenciais e normais, refletem com mais exatidão a dinâmica das forças aplicadas sobre o solo (ROCHA et al., 2007). Assim, se for excedida a tensão cisalhante máxima que o solo suporta, podem ocorrer rupturas, resultando em deformação dos agregados e no aparecimento de estruturas “em forma de placas” (HORN et al., 2007), o que ocasiona camadas com alta densidade do solo e com baixa permeabilidade aos fluxos de água e ar (PIRES et al., 2006).

Por isso, o entendimento da resistência do solo ao cisalhamento pode ser de grande importância na tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo os efeitos nocivos do processo de compactação do solo, uma vez que esta propriedade pode ser um indicativo da estrutura do solo e de seu estado de compactação (ROCHA, 2003).

Embora sejam escassas as informações de resistência ao cisalhamento de solos florestais, resultados semelhantes foram reportados por Silva (2003b), que estudou os efeitos de um sistema de colheita da madeira composto por máquinas semelhantes às do presente estudo sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, constatando que o tráfego das máquinas aumentou a resistência do solo ao cisalhamento, uma vez que a coesão foi aumentada de 22 para 72 kPa com o tráfego associado das máquinas, embora o ângulo de atrito não tenha sido aumentado expressivamente, sendo a resistência do solo ao cisalhamento determinada *in situ* com uso de um aparelho *Sheargraph*. Já Nunes (2010), estudando os efeitos do tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso, verificou que o impacto dessas máquinas sobre o solo alterou, de maneira significativa, a resistência do solo ao cisalhamento, principalmente, da camada superficial do solo, sendo a resistência do solo determinada pelo ensaio de cisalhamento direto. Horn et al. (2004) relataram valores de tensão cisalhante em torno de 200 kPa para máquinas florestais de colheita da madeira, usando um sistema que combinou sensores de transdução de tensão e de deslocamento no solo, ou, SST/DTS (*soil stress transducer/displacement transducer system*).

Em geral, solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento (AZEVEDO, 1999), devido à menor distância entre as partículas do solo, o que proporciona menor índice de vazios e um maior esforço, por exemplo, para operações de revolvimento (ROCHA et al., 2002; EKWUE; STONE, 1995).

Ambos os parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento não apresentaram relação com outras propriedades físicas, exceto ϕ com Mic (Tabela 35), o que, em contraste, foi

verificado por outros autores (SECCO, 2003; BRAIDA, 2004; SILVA; CARVALHO, 2007), principalmente com relação à densidade e umidade do solo.

Tabela 35 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) com a densidade (Ds), porosidade total (Pt) e classes de tamanho de poros no Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Variável	Ds	Pt	Diâmetro de poros (μm)					
			> 50 (Mac)	< 50 (Mic)	50 a 30	30 a 10	10 a 3	< 3
c	0,09 ns	-0,19 ns	-0,17 ns	-0,04 ns	-0,08 ns	-0,22 ns	0,28 ns	0,03 ns
ϕ	0,20 ns	-0,06 ns	0,20 ns	-0,37**	-0,09 ns	-0,24 ns	0,05 ns	-0,26 ns

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

Entretanto, McNabb e Boersma (1993), de forma semelhante, não verificaram relação da resistência ao cisalhamento de solos florestais com a densidade, salientando que nos resultados, a densidade e outras propriedades físicas foram muito mais variáveis do que a resistência ao cisalhamento.

Parte disso pode ser explicado em função dos parâmetros c e ϕ serem características intrínsecas dos solos (BENJAMIN; CRUSE, 1985; RAMAMURTHY, 2001; ZHANG et al., 2001), ou seja, mais influenciados pela composição textural do que por condições de manejo ou tráfego, como visto nas condições estudadas. Apesar disso, em geral, a resistência do solo ao cisalhamento se mostrou útil para detectar alterações físicas provocadas pelo tráfego de máquinas de colheita da madeira.

4.4 Conclusões

Neste estudo, de acordo com as análises e discussão dos resultados, as principais conclusões foram:

- A intensificação do tráfego das máquinas de colheita da madeira promoveu aumento na pressão exercida sobre o solo, resultando em deformação e alteração de todas as propriedades e parâmetros avaliados, sendo que grande parte desse impacto, foi resultante das primeiras passadas das máquinas, o que, em geral, ocorreu após uma passada do *Harvester* mais quatro passadas do *Forwarder*;
- As camadas superficiais do solo, até 20 cm de profundidade, foram menos resistentes à compactação pelo tráfego das máquinas, uma vez que os efeitos de deterioração das propriedades físico-mecânicas, sobretudo, ocorreram em maior magnitude até essa profundidade. Porém, um elevado número de passadas, em torno de uma do *Harvester* mais dezesseis do *Forwarder*, causou deterioração física até das camadas mais profundas do solo;
- O tráfego afetou o solo, principalmente, na zona abaixo da trilha dos rodados das máquinas, entretanto, efeitos residuais de menor magnitude também ocorreram na região entre os rodados das máquinas e mesmo fora da trilha dos rodados;
- A densidade e a distribuição de poros se mostraram interdependentes, assim como a condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade do solo ao ar. Dessa forma, foi possível estimar valores críticos para essas duas últimas propriedades, com base na densidade crítica do solo obtida por meio do intervalo hídrico ótimo;
- O grau de compactação do solo foi melhor estimado utilizando como densidade referência a $D_{S_{MAX}}$, advinda do ensaio de Proctor Normal, e a densidade obtida após a tensão normal de 1600 kPa ($D_{S_{Ref1600}}$), advinda do ensaio de compressão uniaxial, recomendando-se o uso desses métodos para solos florestais;
- A resistência do solo ao cisalhamento foi maior após o tráfego das máquinas de colheita, porém, quase não houve relação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno com outras propriedades físicas do solo;
- Em geral, o efeito de diferentes intensidades de tráfego e as relações entre as propriedades avaliadas possibilitaram melhor compreensão do processo de compactação do solo devido às operações mecanizadas de colheita da madeira, podendo servir potencialmente para a melhoria das práticas de manejo e planejamento das atividades, em busca de operações mais sustentáveis.

5 CONCLUSÕES GERAIS

– Confirmou-se a hipótese de que a qualidade física e trafegabilidade dos solos florestais variam, em maior ou menor magnitude, em função do tipo e estado de compactação, sendo que, quanto mais grosseira for a textura do solo e maior for o estado de compactação, maior será sua trafegabilidade, porém, menor será a sua qualidade física para o crescimento de plantas;

– A hipótese de que a alteração de qualquer propriedade do solo, como capacidade de suporte, reflete na alteração de outra, como o intervalo hídrico ótimo, foi confirmada, uma vez que funções matemáticas utilizando propriedades como densidade, umidade e atributos texturais, foram capazes de estimar as propriedades relacionadas à qualidade física e trafegabilidade, sendo que a relação entre essas resultou no indicador de pressão crítica para o crescimento de plantas;

– Quanto mais intenso foi o tráfego das máquinas de colheita da madeira, maiores alterações ocorreram quanto à deformação e fluxos de água e ar do solo, havendo efeito, principalmente na trilha de tráfego das máquinas e residual entre e fora das trilhas dos rodados, afetando até as camadas mais profundas do solo, confirmando a relacionada hipótese. Contudo, a maior parte dos impactos avaliados foi resultante das primeiras passadas das máquinas de colheita.

6 RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises e resultados dos dois estudos conduzidos neste trabalho, são tecidas as seguintes recomendações:

– É importante que no planejamento das operações sejam contempladas medidas para a redução da compactação, as quais devem levar em consideração as condições de umidade, a intensidade de tráfego submetida e a classe de solo. No presente caso, considerando a trafegabilidade e a susceptibilidade à compactação dos cinco solos que foram avaliados, em condições de maior umidade (próximo da capacidade de campo) recomenda-se que as operações de colheita sejam realizadas em talhões com a seguinte ordem de classe de solo: CXbd > PVd > PVAd > SXe > SXd; já em condições de menor umidade (solo seco) recomenda-se a seguinte ordem de classe de solo: SXe > SXd > PVAd > PVd > CXbd;

– É desejável a concentração do tráfego das máquinas dentro do talhão em menor área possível, uma vez que poucas passadas das máquinas podem causar a maior parte da compactação do solo, por isso, com a adoção dessa medida se reduz a área impactada pelo tráfego, havendo redução da extensão de solo compactado. No caso do CXbd, em condição de solo seco, se possível, recomenda-se que o número de passadas do *Forwarder* seja inferior a oito, pois, um número maior de passadas pode causar alterações físicas até os 60 cm de profundidade. Caso o solo esteja úmido, esse número de passadas deve ser mais restrito ainda;

– Monitorar e gerenciar os impactos das máquinas de colheita sobre o solo é recomendável em busca de melhores alternativas de manejo, visto que as operações de colheita da madeira ocorrem durante todas as estações do ano e não em determinados períodos como na área agrícola e, dessa forma, os impactos sobre o solo são inevitáveis. Portanto, estabelecer níveis aceitáveis de impacto para cada condição (utilizando, por exemplo, informações como valores críticos de propriedades físicas, sejam eles determinados ou estimados por funções), contribui para a otimização das ações de manejo do solo, minimizando o desperdício de energia e tempo nas operações de preparo, assim, reduzindo os custos e aumentando a produtividade;

– Outra ação mitigadora plausível é a disposição dos resíduos da colheita da madeira sobre as trilhas de tráfego, uma vez que os resíduos proporcionam redução da formação de sulcos e distribuem as pressões aplicadas pelo tráfego das máquinas sobre o solo, resultando em maior capacidade de suporte e, conseqüentemente, em menor compactação;

– Também se deve estudar a viabilidade técnica e econômica da utilização de outros sistemas ou máquinas de colheita da madeira, buscando, dessa forma, composições de máquinas que exerçam menor impacto sobre o solo, como, por exemplo, trocar máquinas de pneus por máquinas de esteiras, ou, ainda, usar máquinas com pneus duplos, pneus de maiores dimensões e de baixa pressão de inflação interna e alta flutuação ou rodados em tandem com semiesteiras, contribuindo com menores pressões sobre o solo;

– Em geral, as ações recomendadas para mitigar a compactação de solos florestais devem ser integradas, pois, a compactação é um problema múltiplo que envolve a interação de diversos fatores, portanto, o planejamento adequado das operações possibilita a diminuição da extensão dos efeitos do tráfego sobre o solo, aumento da produtividade, redução dos impactos ao meio ambiente e às rotações florestais futuras e manutenção da sustentabilidade florestal;

– Recomenda-se, em pesquisas futuras, contemplar outras classes de solos e sistemas de colheita, verificar o efeito da compactação ao longo do tempo e, ainda, analisar as respostas das plantas, em experimentos a campo, em relação aos limites críticos de propriedades físicas com intuito de validá-los.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, S.F. **Alterações físicas e químicas de um cambissolo húmico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações.** 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- 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**, v.28, p.519-531, 2004.
- ABU-HAMDEH, N.H. et al. Soil physical properties and infiltration rate as affected by tire dynamic load and inflation pressure. **Transactions of the ASAE**, n.43, p.785-792, 2000.
- ADUR, A.F. **Comportamento de um latossolo vermelho-escuro, textura argilosa, quando submetido a diferentes energias de compactação.** 1990. 86 f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba
- AKAY, A.E.; SESSIONS, J.; ARUGA, K. Designing a forwarder operation considering tolerable soil disturbance and minimum total cost. **Journal of Terramechanics**, v.44, p.187-195, 2007.
- ALAKUKKU, L. Subsoil compaction due to wheel traffic. **Agricultural and Food Science**, v.8, p.333-351, 1999.
- ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1: Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.
- AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behaviour of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v.62, p.319-342, 2001.
- AMPOORTER, E. **Soil compaction due to mechanized forest harvesting: quantification of ecosystem effects and exploration of recovery potential.** 2011. 216 f. Thesis (PhD in Applied Biological Sciences: Land and Forest Management) – University of Ghent, Ghent, Bélgica.
- AMPOORTER, E.; GORIS, R.; CORNELIS, W.M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **Forest Ecology and Management**, v.241, p.162-174, 2007.
- AMPOORTER, E.; NEVEL, V.L.; VOS, D.B.; VERHEYEN, K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. **Forest Ecology and Management**, v.260, p.1664-1676, 2010.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil and Tillage Research**, v.9, p.159-170, 1998.
- AZEVEDO, M.A.A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa – MG.** 1999. 169 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F.; HUNTER, R. Gas diffusion fluid flow and derived pore continuity indices in relation vehicles traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, v.39, p.327-339, 1988.

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

BENJAMIN, J.G.; CRUSE, R.M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.1248-1251, 1985.

BENTHAUS, M. MATTHIES, D. Regeneration befahrener Waldböden. **Allgemeine Forstzeitschrift**, v.48, p.448-451, 1993.

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

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1384-1393, 1998.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.843-849, 2005.

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.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Ed). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994.

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, v.46, p. 2-37, 1991.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; VEIGA, M. da. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.131-139, 2010.

BRAIS, S.; CAMIRÉ, C. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). **Canadian Journal of Soil Science**, v.78, p.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.; ELIASSON, L.; WÄSTERLUND, I. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. **Journal of Terramechanics**, v.40, p.179–190, 2004.

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

CAMP, C.R.; GILL, W.R. The effect of drying on soil strength parameters. **Soil Science Society American Proceedings**. v.33, p.641–644, 1969.

CAMPBELL, D.J. Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994.

CAMPBELL, D.J.; O’SULLIVAN, M.F. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. **Soil Analysis: Physical Methods**. Marcel Dekker, New York, p.399–429, 1991.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425–433, 1990.

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

COLETI, J.T.; DEMATTÊ, J.L.I. Compactação artificial em solos: experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, v.2, p.34–39, 1982.

CUNHA, S.B. da; GUERRA, A.J. **Geomorfologia do Brasil**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 392p.

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**, v.60, p.226–232, 1997.

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.

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**, v.23, p.165–173, 1999.

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.

DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2629-2637, 2008.

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

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v.120, p.227-239, 2004.

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

DIAS JÚNIOR, M.S. **Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um latossolo vermelho-amarelo situado em áreas experimentais da Cenibra**: Relatório do projeto de pesquisa. Lavras: UFLA, 1999. 23p.

DIAS JÚNIOR, M.S.; ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 45-51, 1999.

DIAS JÚNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C.; AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, v.8, p.103-114, 2002.

DIAS JÚNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; WINTER, M.E.; PIRES, J.V.G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, v.27, p.343-349, 2003.

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

DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S.; LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.28, p.805-810, 2004.

DIAS JÚNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, v.62, p.248-255, 2005.

DICKERSON, B.P. Soil compaction after tree-length skidding in Northern Mississippi. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.965-966, 1976

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil water retention curve**. version 3. Piracicaba, 2001.

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

DREWRY, J.J.; CAMERON, K.C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical properties responses to soil compaction from treading and grazing – a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.46, p.237-256, 2008.

DROOGERS, P; FERMONT, A; BOUMA, J. Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the Netherlands. **Geoderma**, v.73, p.131-145, 1996.

EARL, R. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. **Soil and Tillage Research**, v.40, p.155-168, 1997.

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

ELIASSON, L. Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. **Silva Fennica**, v.39, p.549–557, 2005.

ELIASSON, L.; WÄSTERLUND, I. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. **Forest Ecology and Management**, v.252, p.118-123, 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. revisão atualizada. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

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

ETANA, A.; COMIA, R.A.; HÅKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, v.44, p.13-21, 1997.

FENNER, Paulo T. Compactação do solo. In: MACHADO, Carlos C. **Colheita Florestal** (2 ed). Viçosa, MG: UFV, p.375-396, 2008.

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.

FISH, A.N.; KOPPI, A.J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, v.63, p.255-264, 1994.

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

FREIRE, R.D.A. et al. Qualidade de mudas de eucalipto submetidas a diferentes graus de compactação e adubações. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia, **Anais...** Uberlândia: Center Convention, 2011.

FREITAS, L.C.; MACHADO, C.C.; SILVA, E.; JACOVINE, L.A.G. Impactos ambientais na colheita florestal. **Revista da Madeira**, v.20, p.104-110, 2007.

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

FROEHLICH, H.A.; McNABB, D.H. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest sites: In: STONE, E.L. **Proceedings of the sixth North American Conference on Forest Soils and Treatment Impacts**. Department of Forestry, Wildlife and Fisheries, University of Knoxville, p.159-192. 1984.

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. 946-950, 1989.

GOMEZ, A.; POWERS, R.F.; SINGER, M.J.; HORWATH, W.R. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1334-1343, 2002.

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

GREGORY, A.S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil and Tillage Research**, v.89, p.45-57, 2006.

GOULART, R.Z. **Modelagem da curva de compressão e da pressão de preconsolidação do solo**. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, 2006.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, p.65-100, 1987.

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

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

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

HARR, R.D.; FREDRIKSEN, R.L.; ROTHACHER, J. Changes in streamflow following timber harvest in southwestern Oregon. USDA. **Forest Service Research Paper**. Pacific Northwest For. and Range Exp. Stn., Portland, OR, 1979.

HARTE, K.K. The effect of soil deformation on physical soil properties: a discourse on the common background. **Advances in GeoEcology**, v.32, p.22-31, 2000.

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

HEILMAN, P. Root penetration of Douglass-fir seedlings into compacted soil. **Forest Science**, v.27, p.660-666, 1981.

HILL, J.N.S.; SUMNER, M.E. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. **Soil Science**, v.103, p.234-238, 1967.

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

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

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D.; SHEAHAN, T.C. **An introduction to geotechnical engineering** (2 ed). New Jersey: Prentice-Hall, 2010. 864p.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.89-99, 2003.

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.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; PETH, S.; BECKER, S. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. **Forest Ecology and Management**, v.248, p.56-63, 2007.

HOWARD, R.F.; SINGER, M.J.; FRANTZ, G.A. Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. **Soil Science Society of America Journal** v.45, p.231-236, 1981.

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

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

INNS, F. M.; KILGOUR, J. **Agricultural tyres**. London: Dunlop, 1978. 70p.

JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.1208–1211, 1983.

KAISER, D.R. **Estrutura e água em argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.191-205, 2004.

KERTZMAN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação do solo**. 1996. 176 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008. 212p.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de uma Latossolo roxo. **Ciência Rural**, v.30, p.959-964, 2000.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

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

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of Soil Physics**. Elsevier, Amsterdam, 1983.

KOZLOWSKI, T.T. Responses of woody plants to human-induced environmental stresses: issues, problems, and strategies for alleviating stress. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.19, p.91–170, 2000.

KRZIC, M.; BULMER, C.E.; TESTE, F.; DAMPIER, L.; RAHMAN, S. Soil properties influencing compactability of forest soils in British Columbia. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, p.219-226, 2004.

LABELLE, E.R.; JAEGER, D. Soil compaction caused by cut-to-length forest operations and possible short-term natural rehabilitation of soil density. **Soil Science of America Journal**, v.75, p.2314-2329, 2011.

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

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. **Soil and Tillage Research**, v.114, p.57-70, 2011a.

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil and Tillage Research**, v.114, p.71-77, 2011b.

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. **Soil and Tillage Research**, v.114, p.78-85, 2011c.

LAMBE, T.W. **Soil testing for engineers**. 2.ed. New York: J.Wiley, 1951. 165p.

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

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, p.275-286, 1991.

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

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

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 1ª ed. Piracicaba: Edusp, 2005. 335p.

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

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

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

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

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, v.19, p.307-317, 1991.

LIPIEC, J.; STEPNIIEWSKI, W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. **Soil and Tillage Research**, v.35, p.37-52, 1995.

LOPES, E. da S.; SAMPIETRO, J.A.; PEREIRA, A.L.N; OLIVEIRA, D. Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de *Skidder* com diferentes rodados. **Floresta**, v.41, p.471-480, 2011.

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**, v.30, p.369-376, 2006.

LYSNE, D.H.; BURDITT, A.L. Theoretical ground pressure distributions of log skidders (forest equipment). **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.26, p.1327–1331, 1983.

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, p.124-129, 2000.

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, p.349-354, 2011.

McBRIDE, R.A.; JOOSSE, P.J. Overconsolidation in agricultural soils. II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.373-380. 1996.

McNABB, D.H.; BOERSMA, L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.923–929, 1993.

McNABB, D.H.; BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.333–341, 1996.

McNABB, D.H.; STARTSEV, A.D.; NGUYEN, H. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1238-1247, 2001.

MELLO, W. Mecanização no processo de colheita. **Silvicultura**, São Paulo, v.17, n.69, p.1-8, 1997.

MENTGES, M.I. **Implicações do uso do solo nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um argissolo vermelho-amarelo e de um gleissolo háplico**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MENTGES, M.I.; FONTANELA, E.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade máxima pelo ensaio de Proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão uniaxial. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado, **Anais...** Gramado: Serrano Centro de Convenções, 2007.

MONIZ, A.C. **Elementos de pedologia**. USP, Polígono, São Paulo, 1972.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42p.

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

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

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E., eds. **Methods of Soil Analysis**. Part 3, Chemical Methods. 2.ed. Madison, SSSA-ASA, 1996. p.961-1010.

NUNES, A.H.B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo cultivado com eucalipto**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

O'SULLIVAN, M.F., et al.. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v.49, p.325-335, 1999.

OHU, J.O.; RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristic of compacted soils. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.28, p.420-424, 1985.

OJENIYI, S.O.; DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostructure produced by tillage. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.22, p.339-343, 1979.

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.

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

OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.265-270, 2007.

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

PIRES, B.S.; ROCHA, W.W.; NUNES, A.H.B.; CARVALHO, R.C.R.; NUNES, P.H.B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIÊNTÍFICA, 8.: ENCONTRO DE DIVULGAÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2006, Campanha. **Anais...** Campanha: UEMG/FAPEMIG, 2006. CD-ROM.

RADAMBRASIL. **Folha SH22-Porto Alegre e Parte das Folhas SH21-Uruguaiana e SI21-Lagoa Mirim**. IBGE. Rio de Janeiro. v.33, 1986.

RAMAMURTHY, T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.38, p.1-15, 2001.

RAPER, R.; ERBACH, D. Prediction of soil stresses using the finite element method. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.725-730, 1990.

REGAZZI, A.J.; LEITE, H.G. **Análise de regressão: teoria e aplicações em manejo florestal**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Departamento de Engenharia Florestal: SIF. 1993. 238p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.29-102, 2010.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop. production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

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

REINERT, D. J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J. M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

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

RIBEIRO, M.A.V. et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e as doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1157-1161, 2010.

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**, v.47, p.25-31, 2004.

ROBERTSON, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.

ROCHA, W.W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG**. 2003. 101 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ROCHA, W.W.; BORGES, S.R.; VICTORIA, E.P.; NUNES, A.H.B. Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In: ABREU, M.H.N. **Ciências ambientais: abordagem multidisciplinar**. Belo Horizonte: UEMG, 2007. p.87-124.

ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.297-303, 2002.

ROLLERSON, T.P. Influence of wide-tire skidder operations on soils. **International Journal of Forest Engineering**, v.2, p.23-30, 1990.

ROLOFF, G. **Aspectos dinâmicos da estrutura de solos agrícolas e seu estudo**. Washington: Embaixada do Brasil, 1986.

ROSA, D.P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

RUARK, G.A.; MADER, D.L.; TATTAR, T.A. The influence of soil compaction and aeration on the root growth and vigour of trees – a literature review. Part I. **Arboricultural Journal**, v.6, p.251-265, 1982.

SAMPIETRO, J.A. **Compactação de cambissolo e neossolos causada pela colheita de madeira com *Feller-Buncher* e *Skidder***. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati.

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

SANTOS, M.A.P. et al. Evolução multitemporal do uso e cobertura da terra no município de São Gabriel, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.

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

SCHNURR-PÜTZ, S. et al. Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes. **FEMS Microbiology Ecology**, v.58, p.503-516, 2006.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003, 108f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

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

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

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75 p. Tese (Livredocência) – ESALQ/USP, Piracicaba, SP. 2000.

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

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, v.60, p.73-87, 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**, v.54, p.9-16, 1998.

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**, v.31, p.1047-1052, 2007.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1419-1427, 2008.

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

SEVERIANO, E.C. et al. Structural changes in latosols of the cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011.

SHERIDAN, G.J. A comparison of rubber-tyred and steel-tracked skidders on forest soil physical properties. **Australian Journal of Soil Research**, v.41, p.1063-1075, 2003.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.921-930, 2006.

SILVA, A.J.N.; CARVALHO, F.H. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.853-862, 2007.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.884-888, 1997.

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

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.91-95, 1986.

SILVA, A.P. et al. Indicadores da qualidade física do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.241-281, 2010.

SILVA, J.R. **Compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas de colheita de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2003b. 153 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.

SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Resistência ao cisalhamento em um Latossolo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.165-173, 2004.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; PEREIRA, P.R.G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1001-1010, 2002a.

SILVA, S.R. et al. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.921-932, 2008.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003a. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade 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. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p. 1-8, 2002b.

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

SMITH, C.W. Does soil compaction on harvesting extraction roads affect long-term productivity of Eucalyptus plantations in Zululand? **Southern African Forestry Journal**, v.199, p.41-54, 2003.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing compaction susceptibility of forestry soil. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997a.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing compaction susceptibility of forestry soil. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. **Soil and Tillage Research**, v.43, p.335-354, 1997b.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, v.78, p.93-111, 1997c.

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

SÖHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v.39, p.276-281, 1958.

STARTSEV, A.D.; McNABB, D.H. Skidder traffic on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameters of boreal forest soils. **Soil Science Society American Journal**, v.65, p.224-231, 2001.

STARTSEV, A.D.; McNABB, D.H. Effects of compaction on aeration and morphology of boreal forest soils in Alberta, Canada. **Canadian Journal of Soil Science**, v.89, p.45-56, 2009.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-235, 1991.

STRECK, C.A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do sul do Brasil**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S. **Qualidade físico-hídrica de um argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil**. 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades

físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.963-973, 2008.

TANAKA, O.K. Exploração e transporte da cultura do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, p.24-30, 1986.

TEEPE, R.; BRUMME, R.; BEESE, F.; LUDIG, B.. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society American Journal**, v.68, p.605-611, 2003.

TISDALL, J.M; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, p.141-163, 1982.

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

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja**. EMBRAPA – Circular Técnica, Londrina, n.12, 58p. 1999.

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

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

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

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1220-1225, 1984.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.4, p.242-246, 1961.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. 2004. 63 f. Schriftenreihe (Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde) - Christian Albrechts Universität Kiel, Kiel.

VOSSBRINK, J.; HORN, R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. **European Journal Forest Research**, v. 123, p.259-267, 2004.

WÄSTERLUND, I. Environmental aspects of machine traffic. **Journal of Terramechanics**, v.31, p.265-277, 1994.

WARKENTIN, B.P. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE, 1971. p.126-153.

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

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

WOOD, M.J.; DOUGLAS, R.A.; SANDS, R. The Taringatura study: the effects of harvest machine traffic and tillage on forest soil in New Zealand. **International Journal of Forest Engineering**, v.22, p.53-66, 2006.

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, 1997.

WRONSKI, E. Impact of tractor thinning operations on soils and tree roots in a Karri forest, western Australia. **Australian Forestry Research**, v.14, p.319–332, 1984.

WRONSKI, E.B. Logging trials near Tumut. **Logger**, April/May: p.10-14, 1990.

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

ZHANG, B.; HORN, R.; HALLETT, P.D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.864-871, 2005.

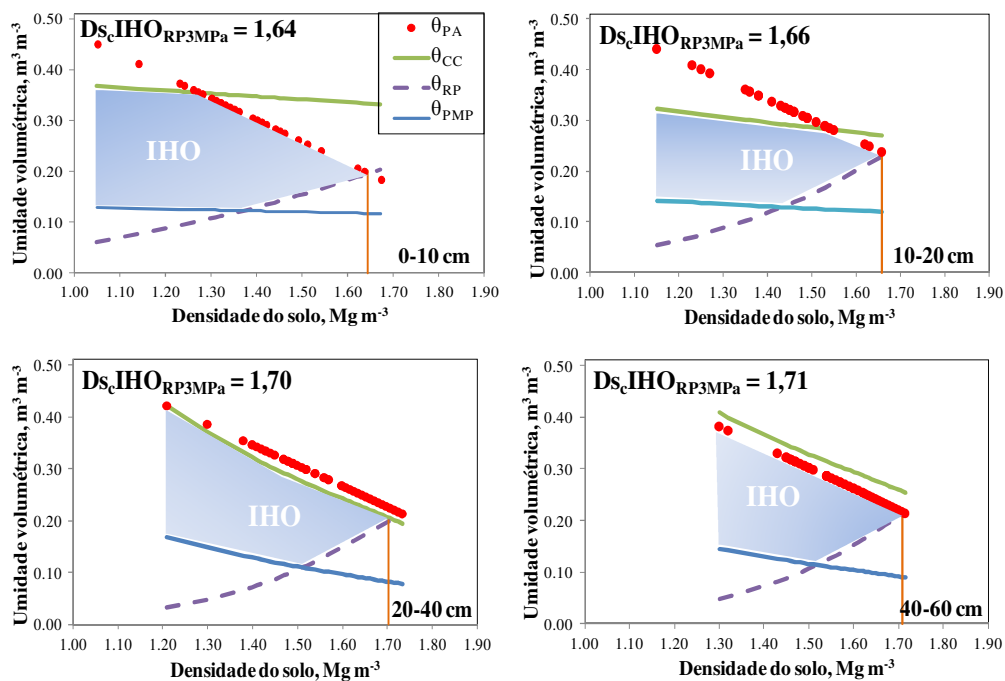
ZHANG, B.; ZHAO, Q.G.; HORN, R.; BAUMGARTL. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. **Soil and Tillage Research**, v.59, p.97-106, 2001.

ZHAO, Y.; KRZIC, M.; BULMER, C.E.; SCHMIDT, M.G. Maximum bulk density of British Columbia forest soils from the Proctor Test: relationships with selected physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.442-452, 2008.

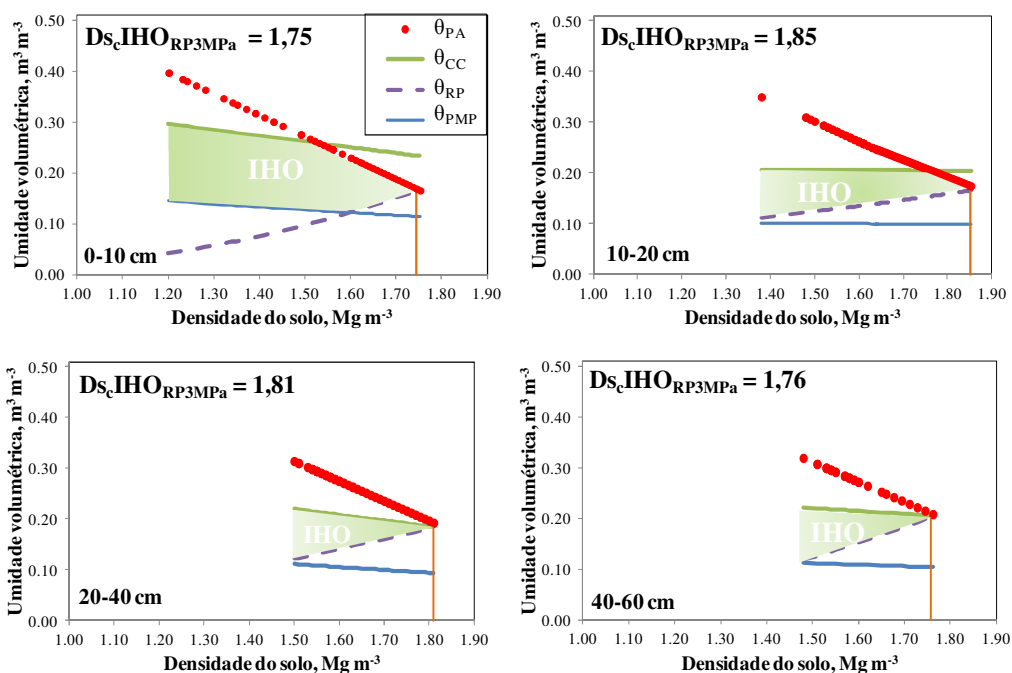
ZHAO, Y.; KRZIC, M.; BULMER, C.E.; SCHMIDT, M.G.; SIMARD, S.W. Relative bulk density as a measure of compaction and its influence on tree height. **Canadian Journal of Forest Research**, v.40, p.1724–1734, 2010.

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**, v.28, p.947-958, 2000.

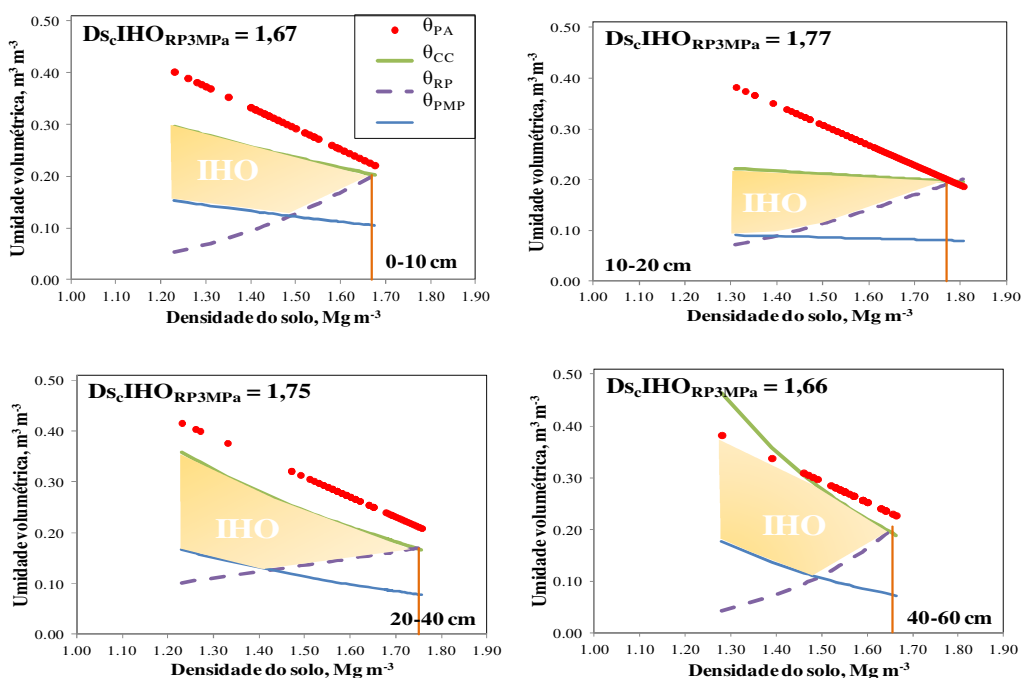
8 ANEXOS



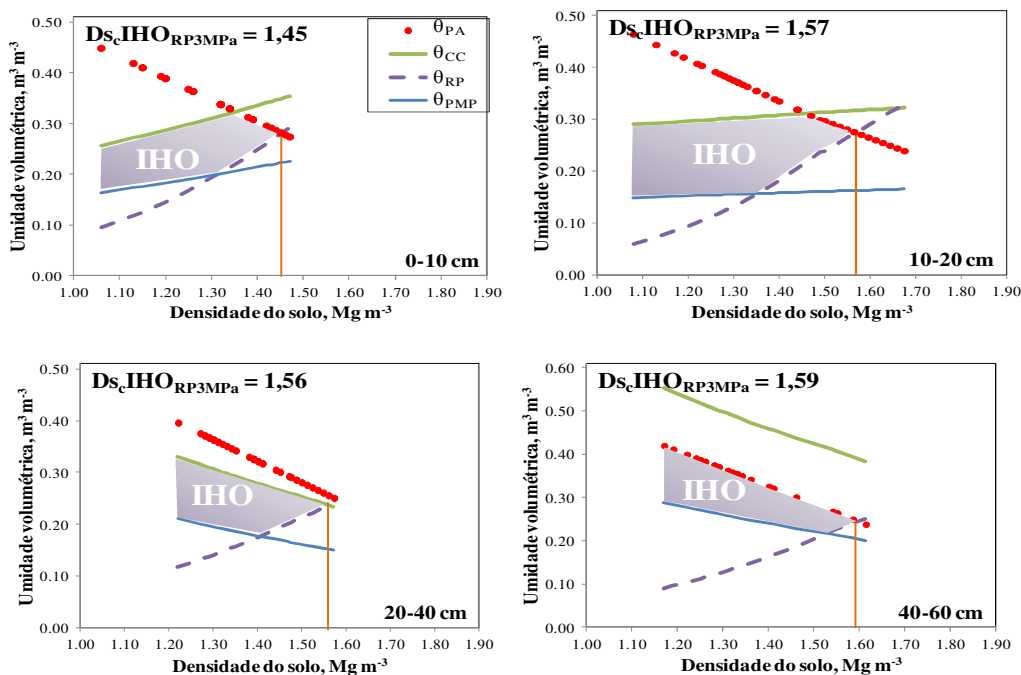
Anexo 1 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c, IHO, RP3MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.



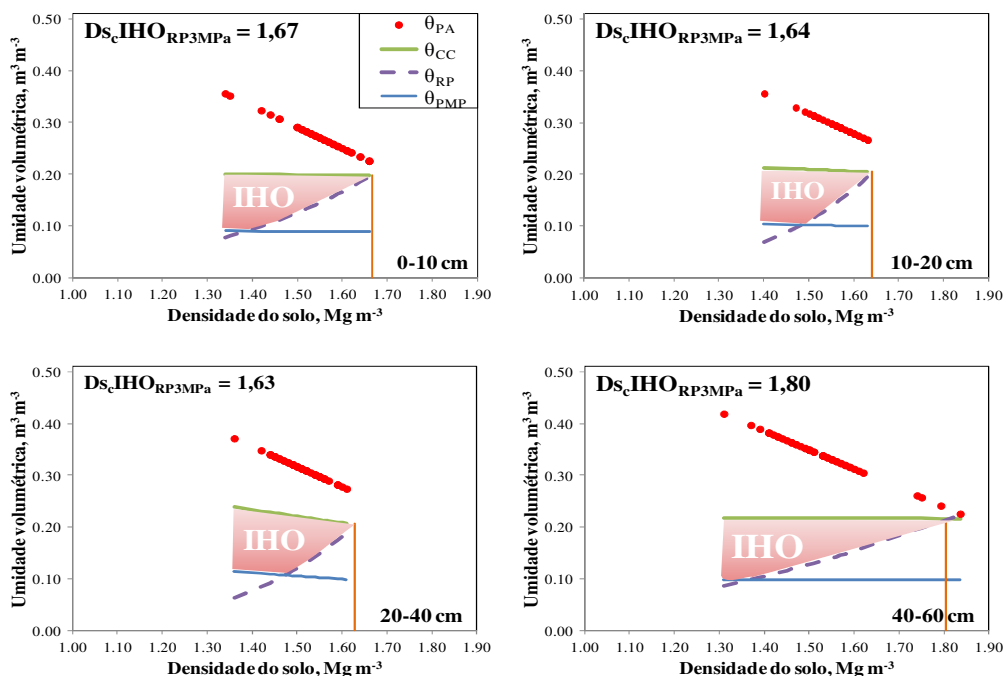
Anexo 2 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PvD); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s,IHO,RP3MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.



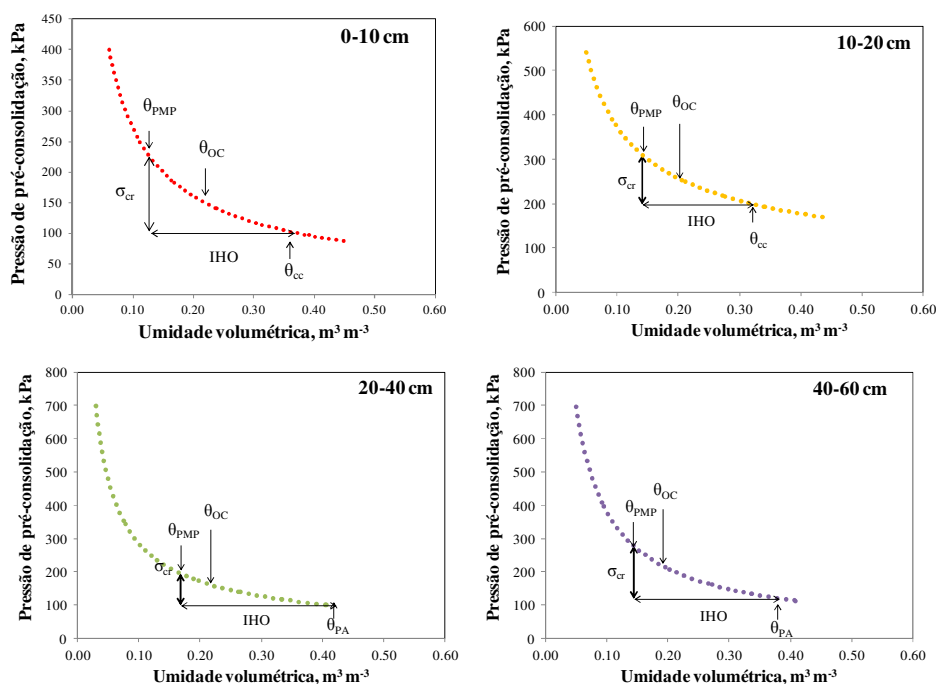
Anexo 3 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s,IHO,RP3MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.



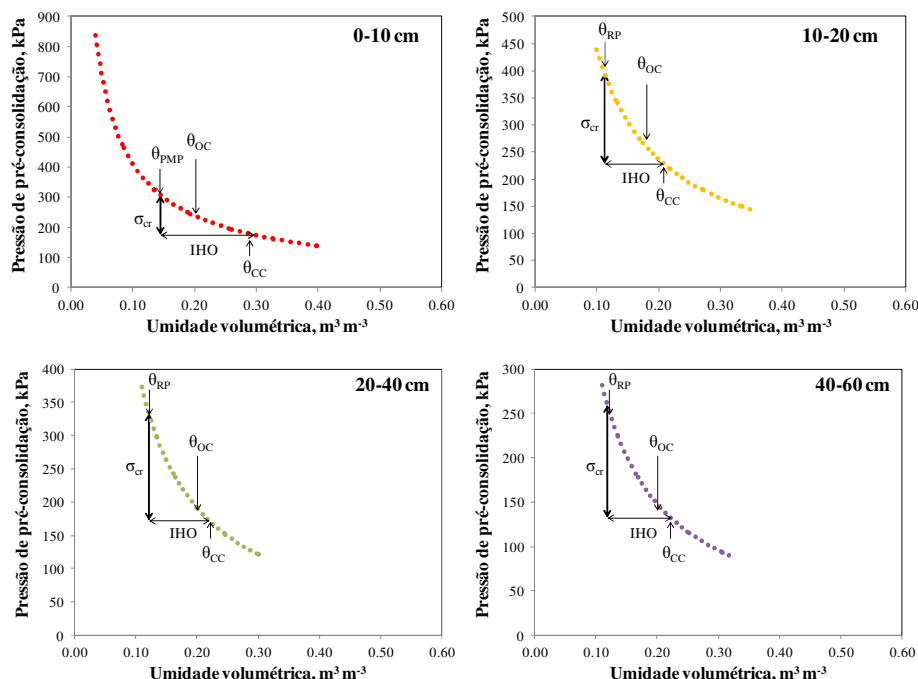
Anexo 4 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.



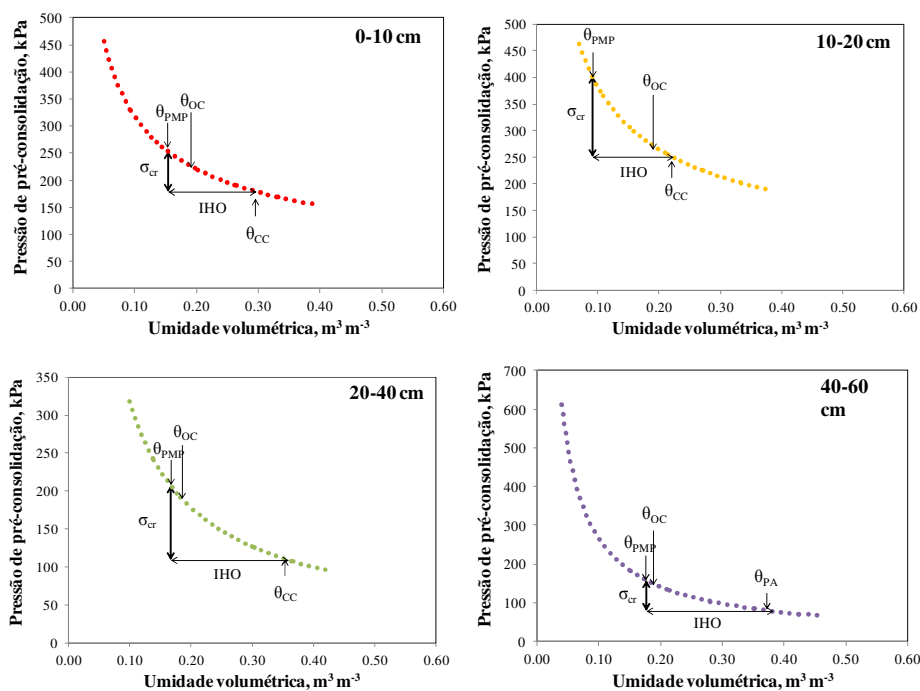
Anexo 5 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.



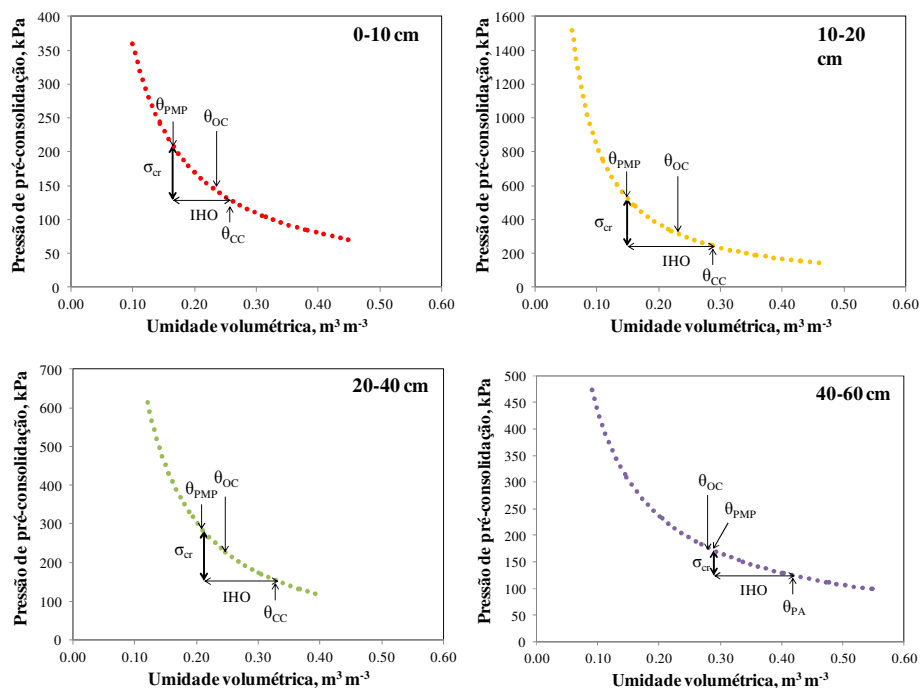
Anexo 6 – Variação da pressão de pré-consolidação, em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 3 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico (SXe); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.



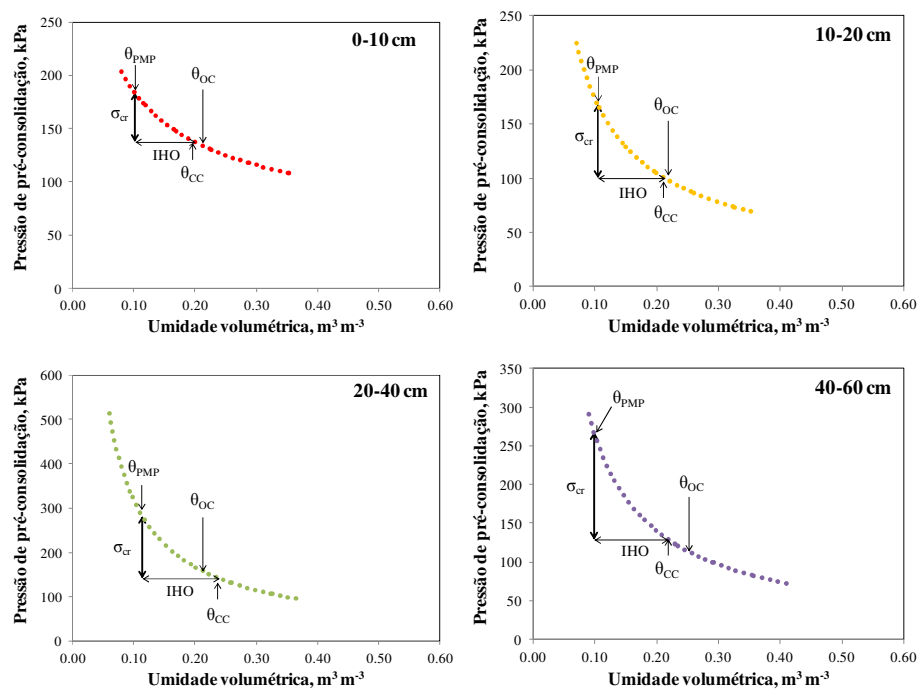
Anexo 7 – Variação da pressão de pré-consolidação, em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 3 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Argissolo Vermelho Distrófico (PVd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 3 MPa; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.



Anexo 8 – Variação da pressão de pré-consolidação, em função da umidade para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 3 MPa no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{RP} : umidade quando a resistência à penetração é igual a 3 MPa; θ_{PA} : umidade quando porosidade de aeração é igual a $0,1 m^3 m^{-3}$; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.



Anexo 9 – Variação da pressão de pré-consolidação, em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 3 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Distrófico gleissólico (SXd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.



Anexo 10 – Variação da pressão de pré-consolidação, em função da umidade volumétrica para os valores de densidade crítica, considerando resistência à penetração crítica de 3 MPa, para as quatro camadas avaliadas do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); σ_{cr} : faixa de pressão de pré-consolidação crítica; IHO: faixa de intervalo hídrico ótimo; θ_{OC} : umidade ótima de compactação; θ_{CC} : umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} : umidade no ponto de murcha permanente.