

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

**PREPAROS E ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS PARA
PLANTIO DE EUCALIPTO**

TESE DE DOUTORADO

Cedinara Arruda Santana Morales

Santa Maria, RS, Brasil.

2014

PREPAROS E ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS PARA PLANTIO DE EUCALIPTO

Cedinara Arruda Santana Morales

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 **Doutora em Engenharia Florestal**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil.

2014

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

Morales, Cedinara Arruda Santana
Preparos e atributos físicos de solos para plantio de eucalipto./
Cedinara Arruda Santana Morales. – 2014.
183 p.; 30cm

Orientador: José Miguel Reichert
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria,
Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós- Graduação
em Engenharia Florestal, RS, 2014.

1. Produtividade florestal 2. *Eucalyptus saligna*
3. Intervalo hídrico ótimo 4. Solos Florestais 5. Atributos do solo
I. Reichert, José Miguel II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Cedinara Arruda Santana Morales. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço Eletrônico: cedinarasm@gmail.com

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

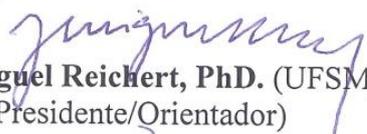
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

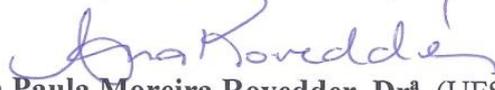
**PREPAROS E ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS PARA
PLANTIO DE EUCALIPTO.**

elaborada por
Cedinara Arruda Santana Morales

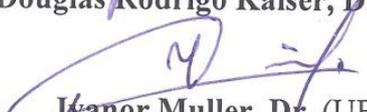
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutora em Engenharia Florestal

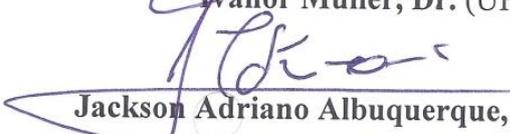
COMISSÃO EXAMINADORA:


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


Ana Paula Moreira Rovedder, Dr^a. (UFSM)


Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)


Ivanor Muller, Dr. (UFSM)


Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)

Santa Maria, 24 de fevereiro de 2014.

Dedico

Com amor,

Aos meus amados pais Dimar e Enio Santana.

Ao meu esposo Bruno Pimentel Morales.

Ao acadêmico de Eng. Florestal Marton Matana

(in memorian).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, que possibilitaram a realização deste doutorado;

À Capes pela concessão da bolsa;

À empresa Celulose Riograndense CMPC pelo apoio técnico, logístico e financeiro na realização desta pesquisa; em especial ao Engenheiro Florestal Elias Frank de Araújo pelo apoio, oportunidade e incentivo tão importante ao desenvolvimento deste trabalho;

Ao professor PhD. José Miguel Reichert pela oportunidade e orientação;

Aos professores componentes da banca examinadora pelas sugestões e melhorias ao presente trabalho;

Aos meus pais Dimar e Enio Santana, peças fundamentais da minha existência, por terem se dedicado tanto ao meu crescimento pessoal e profissional, pela torcida, pelo apoio e pelo amor que sempre me dedicaram.

Ao meu esposo, Engenheiro Florestal Bruno Pimentel Morales, pelo apoio, pela paciência, cumplicidade e amor;

Aos meus irmãos pela torcida e pelo companheirismo;

Ao Pedro Henrique Rodrigues Borges, acadêmico de Engenharia Florestal, sempre tão prestativo, pelo auxílio e amizade em todos os momentos;

Aos colegas do laboratório de Física do Solo, pela amizade e companheirismo; em especial à Denise Szymczak; Martha Drescher, Patrícia Pértile, prof. Paulo Gubiani, Prof. Jean Minella, Flávio Fontinelli, Cláudia de Barros, Eloi Paulus, Bernardo R. da Silva, Claudine Consensa, Maísa Zardin, Júlio C. W. Soares, Jhon J. Zuluaga e Alan E. de Oliveira.

As queridas amigas Charlotte Wink, Suzana da Rosa e Eracilda Fontanela pela amizade.

Ao colega Jean Alberto Sampietro pela ajuda, incentivo e amizade.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”.

Chico Xavier

RESUMO

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

PREPAROS E ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS PARA PLANTIO DE EUCALIPTO

AUTORA: CEDINARA ARRUDA SANTANA MORALES
ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 24 de fevereiro de 2014.

Com a expansão da produção florestal no Rio Grande do Sul, houve aumento na área dos plantios florestais anteriormente dominadas pela pecuária e pelos cultivos agrícolas. O objetivo foi gerar recomendações adequadas de preparo, com base nos indicadores de qualidade. O estudo foi realizado em três áreas destinadas ao cultivo de mudas clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, pertencentes à empresa Celulose Riograndense, nos municípios de São Gabriel e Vila Nova do Sul, no RS. Os solos das áreas estudadas são classificados como Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh). Na área de estudo foi feito, inicialmente, um levantamento piloto para observar a variabilidade espacial da textura e da resistência mecânica do solo à penetração (RP); posteriormente, foram realizadas amostragens do solo, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. Após a caracterização e análise do solo das áreas, foram aplicados diferentes preparos de solo (subsolação a 50 cm de profundidade mais enxada rotativa (S50), subsolação a 50 cm de profundidade mais camalhão (S50C) e subsolação a 70 cm de profundidade mais enxada rotativa (S70)) e, posteriormente, foi realizado o plantio de clones de *Eucalyptus saligna* Smith (3,5 x 2,6 m). Aos 6, 12, 18 e 24 meses após o plantio, foram feitas as avaliações dendrométricas de altura total e diâmetro à altura do peito (dap 1,30 m). O uso conjunto da análise fatorial e da variabilidade espacial da RP permitiu identificar, locais com diferentes estados de compactação. O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi fortemente limitado pela resistência à penetração e pela aeração do solo, nos solos mais argilosos. Os valores de densidade do solo mais Argissolo, nos maiores estados de compactação, foram superiores à densidade crítica com base no IHO. O preparo do solo com maior volume de solo mobilizado (S50C), no SXe (1267,1 m³ ha⁻¹) e no RReh (836,8 m³ ha⁻¹), favoreceu o melhor desenvolvimento inicial do *Eucalyptus saligna* Smith. No SXe a altura média aos 24 meses de idade foi de 10,38 m e dap de 9,90 cm e, no RReh, a altura foi de 10,15 m e dap de 10,60 cm. No NVd, o maior crescimento foi observado no tratamento S70, com altura média aos 24 meses de idade de 9,77 m e dap de 9,68 cm. Os resultados deste trabalho indicam que a escolha do melhor preparo de solo depende da textura, grau de compactação, densidade crítica e da resistência à penetração do solo. Assim, para o Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico e para o Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico o melhor preparo de solo foi o tratamento S50C e, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico, foi o tratamento S70.

Palavras-chave: Produtividade florestal. Compactação do solo. Preparo do solo.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Forest Engineering Graduation Program
Federal University of Santa Maria

SOIL TILLAGE AND PHYSICAL PROPERTIES FOR EUCALIPTUS

AUTHOR: CEDINARA ARRUDA SANTANA MORALES

ADVISOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place e Date: Santa Maria, February 24th, 2014.

With the expansion of cultivated forest in Rio Grande do Sul, there was an increase of the forest plantations, now occupying areas previously used for livestock and agricultural crops. The objective was to generate recommendations for soil tillage, based on soil quality indicators. The study was conducted in three areas for the cultivation of clonal seedlings of *Eucalyptus saligna* Smith belonging to Celulose Riograndense in the state of Rio Grande do Sul. The soils are classified as Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) and Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh). Initially a pilot survey was done to quantify the spatial variability of texture and soil resistance to penetration (RP); subsequently, soil samples were taken at depths of 0-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm. After the characterization and analysis of soil areas different soil tillages (subsoiling to 50 cm depth plus rotary hoe (S50), subsoiling to 50 cm depth with ridge (S50C), and subsoiling to 70 cm depth plus rotary hoe (S70). Planting of *Eucalyptus saligna* Smith clones (3.5 x 2.6 m) was carried out. At 6, 12, 18 and 24 months after planting, the dendrometric evaluation of total height and diameter at breast height (dbh 1.30 m). The joint use of factor analysis and spatial variability of RP enabled us to identify locations with different compaction states. The least limiting water range (LLWR) was strongly affected by the penetration resistance and soil aeration in clayey soils. The bulk density values of Argissolos, in the larger states of soil compaction, were above the critical density based on the LLWR. The soil tillage with greater volume of soil disturbed (S50C), in SXe ($1267.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) and RReh ($836.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), favored the initial development of *Eucalyptus saligna* Smith. In SXe at 24 months-old forest, the height was 10.38 cm and dbh of 9.90, whereas for the RReh the height was 10.15 m and dbh of 10.60 cm. In NVd, the highest growth was observed in the treatment S70, with an average height at 24 months of 9.77 m and dbh of 9.68 cm. The results of this study indicate that the choice of the best tillage depends on the texture, degree of compaction, critical density and penetration resistance of the soil. Thus, for Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico and the Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico the best tillage was S50C, while for the Nitossolo Vermelho Distrófico típico was S70.

Keywords: Forest productivity. Soil compaction. Soil tillage.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Croqui dos pontos de resistência à penetração amostrados no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico em áreas de implantação, em São Gabriel, RS..... 51
- Figura 2** – Croqui dos pontos de resistência à penetração amostrados no Nitossolo Vermelho Distrófico típico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS..... 52
- Figura 3** – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a) e amostragem realizada (b)..... 53
- Figura 4** – Implemento utilizado para subsolagem (a), subsolagem do solo concomitante a fosfatagem (b), confecção de camalhão (c), parcelas com e sem camalhão (d), medição das parcelas (e) e plantio das mudas (f). 59
- Figura 5** – Resistência do solo à penetração observada no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe) em área de implantação, em São Gabriel, RS..... 70
- Figura 6** – Resistência do solo à penetração observada no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS..... 70
- Figura 7** – Resistência do solo à penetração observada no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) em área de implantação, em São Gabriel, RS. 71
- Figura 8** – Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico em área de implantação, em São Gabriel, RS. 74
- Figura 9** – Semivariogramas ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Nitossolo Vermelho Distrófico típico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS. 75
- Figura 10** – Semivariogramas ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico em área de implantação, em São Gabriel, RS. 75
- Figura 11** – Mapas de isolinhas da resistência do solo à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico em área de implantação, em São Gabriel, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 6,0 cm; o (b) camada de 10,5 – 21,0 cm; (c) camada de 27,0 – 42,0 cm e o (d) representa a camada de 46,5 – 58,5 cm de profundidade..... 76
- Figura 12** – Mapas de isolinhas da resistência à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Nitossolo Vermelho Distrófico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 4,5 cm; o (b) camada de 7,5 – 15,0 cm; (c) camada de 19,5 – 27,0 cm; (d) camada de 34,5 – 37,5 cm e o (e) representa a camada de 51,0 – 58,5 cm de profundidade. 77
- Figura 13** – Mapas de isolinhas da resistência à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico em área de implantação, em São Gabriel, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 6,0 cm; o (b) camada de 9,0 – 15,0 cm; (c) camada de 22,5 – 31,5 cm; (d) camada de 43,5 – 58,5 cm de profundidade. 79

Figura 14 – Análise granulométrica do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).	80
Figura 15 – Volume da distribuição dos poros no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3).	85
Figura 16 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico.	86
Figura 17 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico.	88
Figura 18 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.	89
Figura 19 – Variação da água disponível (AD) no perfil do solo, nos diferentes estados de compactação no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh). Limite superior: umidade do solo na capacidade de campo; Limite inferior: umidade do solo no ponto de murcha permanente. .	92
Figura 20 – 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 gleissólico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.	94
Figura 21 – 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 Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.	95
Figura 22 – 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 Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.	97
Figura 23 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$) e a 3 MPa ($D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$), com os conteúdos de argila (1), silte (2), silte + argila (3), areia grossa (4), areia fina (5) e carbono orgânico do solo (6); *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	103
Figura 24 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função da densidade do solo no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).	104
Figura 25 – Variação do conteúdo de água disponível em função da densidade do solo para o SXe, NVd e RReh, nas respectivas camadas avaliadas.	105

Figura 26 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.....	107
Figura 27 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas do perfil do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.....	108
Figura 28 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas do perfil do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.....	109
Figura 29 – Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal para os três tipos de solos e respectivas camadas avaliadas, R^2 : coeficiente de determinação.	111
Figura 30 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo máxima com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila + silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f), *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	114
Figura 31 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a umidade ótima de compactação com os conteúdos de argila (a), argila + silte (b), silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f), *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.	115
Figura 32 – Grau de compactação considerando a relação $D_{sc}IHO_{RP3MPa}$ e D_{sMAX} para as quatro camadas dos solos avaliados; linhas traceja e sólida indicam grau de compactação a 85 e 95 %, respectivamente.	116
Figura 33 – Grau de compactação considerando a relação Densidade do solo nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3) e a D_{sMAX} para as quatro camadas dos solos do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe).....	117
Figura 34 – Grau de compactação considerando a relação nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3) e D_{sMAX} para as quatro camadas do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).	118
Figura 35 – Grau de compactação considerando a relação Densidade do solo e a D_{sMAX} para as quatro camadas do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).	118
Figura 36 – Efeito triangular do preparo somente com subsolagem (1) e efeito pentagonal no preparo de subsolagem mais camalhão (2).	119
Figura 37 – Temperaturas atingidas nas áreas da CMPC na geada de Junho de 2012.....	122
Figura 38 – Grau de compactação considerando a relação entre a densidade do solo nos tratamentos de preparo (S50, S70 e S50C) e a D_{sMAX} para as quatro camadas dos solos do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).	128
Figura 39 – Ilustração da matocompetição observada nos tratamentos subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa (S50) e subsolagem a 50 cm mais camalhão (S50C).	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição granulométrica dos solos estudados.	50
Tabela 2	– Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXE).	66
Tabela 3	– Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).	67
Tabela 4	– Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).	68
Tabela 5	– Média, mediana, amplitude, coeficiente de variação (%), assimetria, curtose, mínimo e máximo para a resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas diferentes camadas obtidas por análise fatorial de Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, em áreas de implantação de <i>Eucalyptus saligna</i>	72
Tabela 6	– Estimativa dos parâmetros dos modelos teóricos ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, em áreas de implantação, em São Gabriel, RS.	73
Tabela 7	– Densidade do solo em diferentes estados de compactação em um Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.	82
Tabela 8	– Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo nos diferentes estados de compactação.	83
Tabela 9	– Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) obtida através da curva de retenção de água no solo.	91
Tabela 10	– 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.	99
Tabela 11	– 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.	100
Tabela 12	– Valores de densidade crítica (D_{s_cIHO}) e limites superior (LS) e inferior (LI) para o intervalo hídrico ótimo 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.	101
Tabela 13	– Densidade máxima ($D_{s_{MAX}}$) e umidade ótima de compactação (U_{oc}) para os três tipos de solos e respectivas camadas avaliadas.	112
Tabela 14	– Área da secção transversal de solo mobilizado (ASM) e volume de solo mobilizado (VSM) nos tratamentos de preparo de solo.	120
Tabela 15	– Índice de sobrevivência (%) em povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> em diferentes solos e preparo de solo.	121

Tabela 16	– Altura média (m) de <i>Eucalyptus saligna</i> nos diferentes tipos de preparo.	124
Tabela 17	– Diâmetro médio (cm) de <i>Eucalyptus saligna</i> em diferentes tipos de preparo..	125
Tabela 18	– Área basal média (m ² ha ⁻¹) de <i>Eucalyptus saligna</i> em diferentes tipos de preparo.	126
Tabela 19	– Densidade do solo em diferentes tipos de preparo do solo em um Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.	127
Tabela 20	– Porosidade total, macro e microporosidade em diferentes tipos de preparo do solo em um Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.	130
Tabela 21	– Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível em diferentes tipos de preparo do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, Argissolo Vermelho Distrófico e Neossolo Regolítico.	132

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

%	Percentual
AD	Conteúdo de água disponível ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
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
Argila	Partículas do solo de diâmetro menor que 0,002 mm
ASM	Área de solo mobilizado (m^2)
Cascalho	Partículas do solo de diâmetro entre 20 a 2 mm
CC	Capacidade de campo (% ou $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
cm	Centímetro
cm h⁻¹	Centímetros por hora
cm²	Centímetro quadrado
Co	Efeito pepita
Co+C	Patamar
C-org	Carbono orgânico do solo (g kg^{-1})
CRA	Curva de retenção de água no solo
DAP	Diâmetro à altura do peito (cm)
DAP	Diâmetro a altura do peito (1,30 m)
Dp	Densidade de partículas do solo (Mg m^{-3})
Ds	Densidade do solo (Mg m^{-3})
Ds_{cIHO}	Densidade do solo crítica baseada no intervalo hídrico ótimo
Ds_{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
Ds_{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
Ds_{MAX}	Densidade máxima do solo (Mg m^{-3})
EC	Estado de compactação
exp	Exponencial
F	Valor de F calculado
G	Área basal em $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$
g kg⁻¹	Grama por quilograma

GC	Grau de compactação (%)
GDE	Grau de dependência espacial
h	Hora
H	Altura em metro
ha	Hectare
IHO	Intervalo hídrico ótimo
IHO_{MAX}	Valor em umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) na máxima amplitude do intervalo hídrico ótimo
kg	Quilograma
kg kg⁻¹	Quilograma por quilograma
kPa	Quilopascal
LI	Limite inferior
Ln	Logaritmo natural
LS	Limite superior
m	Metro
m²	Metro quadrado
m² ha⁻¹	Metro quadrado por hectare
m³	Metro cúbico
m³ ha⁻¹	Metro cúbico por hectare
m³ m⁻³	Metro cúbico por metro cúbico
Mac	Macroporosidade, poros de diâmetro superior a 50 μm ($m^3 m^{-3}$)
Mg	Megagrama
Mg m⁻³	Megagrama por metro cúbico
Mic	Microporosidade, poros de diâmetro inferior a 50 μm ($m^3 m^{-3}$)
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Número de repetições
°	Graus
°C	Graus Celsius
PA	Porosidade de aeração (% ou $m^3 m^{-3}$)
PMP	Ponto de murcha permanente (% ou $m^3 m^{-3}$)
Pt	Porosidade total ($m^3 m^{-3}$)
PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico

PVd	Argissolo Vermelho Distrófico
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson
R²	Coefficiente de determinação
R² aj.	Coefficiente de determinação ajustado
RP	Resistência do solo à penetração (MPa)
RR	Neossolo Regolítico
s	Segundo
Silte	Partículas do solo de diâmetro entre 0,05 a 0,002 mm
Syx	Erro padrão da estimativa
U_C	Umidade gravimétrica ótima de compactação (% ou kg ¹ kg ⁻¹)
U_g	Umidade gravimétrica do solo ou umidade em base de massa (% ou kg ¹ kg ⁻¹)
VSM	Volume de solo mobilizado (m ³ ha ⁻¹)
θ	Umidade volumétrica do solo ou umidade em base volumétrica (m ³ m ⁻³)
θ_{CC}	Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo (m ³ m ⁻³)
θ_{OC}	Umidade volumétrica ótima de compactação (m ³ m ⁻³)
θ_{PA}	Umidade volumétrica do solo em determinado valor de porosidade de aeração (m ³ m ⁻³)
θ_{PMP}	Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)
θ_r	Umidade volumétrica do solo residual (m ³ m ⁻³)
θ_{RP}	Umidade volumétrica do solo em determinado valor de resistência à penetração (m ³ m ⁻³)
θ_s	Umidade volumétrica do solo em saturação (m ³ m ⁻³)
Ψ_m	Tensão de água no solo (kPa ou MPa)

LISTA DE APÊNDICES

- APÊNDICE A** – Análise química do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) antes da implantação do experimento. 161
- APÊNDICE B** – 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 gleissólico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa. 162
- APÊNDICE C** – 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 Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa. 163
- APÊNDICE D** – 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 Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c}IHO_{RP2MPa}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa. 164
- APÊNDICE E** – Dendogramas apresentam os resultados das análises de clusters calculadas para VSM, D_s e PT. 165
- APÊNDICE F** – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe). 166
- APÊNDICE G** – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd). 167
- APÊNDICE H** – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh). 168
- APÊNDICE I** – Distribuição radicular do *Eucalyptus saligna* nos diferentes tratamentos (S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão) no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico. 169
- APÊNDICE J** – Distribuição radicular do *Eucalyptus saligna* nos diferentes tratamentos (S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão) no Nitossolo Vermelho Distrófico típico. 170

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 Hipótese	31
1.2 Objetivos.....	31
1.2.1 Objetivos específicos.....	32
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	33
2.1 Gênero <i>Eucalyptus</i> : perspectiva do Brasil.....	33
2.1.1 Espécie <i>Eucalyptus saligna</i> SMITH.....	33
2.2 Fatores do solo ligados ao crescimento do Eucalipto.....	34
2.3 Compactação do solo.....	36
2.4 Integração dos fatores físicos do solo com o crescimento de plantas	38
2.5 Indicador de qualidade do solo	41
2.6 Preparo do solo	44
2.7 Fertilidade do solo e a nutrição de plantas	46
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 Caracterização das áreas de estudo.....	49
3.2 Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração	50
3.3 Procedimento amostral	52
3.4 Determinações	54
3.4.1 Determinações das propriedades físicas do solo	54
3.4.1.1 Granulometria e densidade de partículas.....	54
3.4.1.2 Densidade, porosidade do solo, curva de retenção de água e conteúdo de água disponível	54
3.4.1.3 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e grau de compactação	55
3.4.1.4 Intervalo hídrico ótimo	56
3.4.2 Determinação das propriedades químicas do solo.....	57
3.5 Operações silviculturais.....	58
3.6 Tratamentos	58
3.7 Mobilização do solo	60
3.8 Avaliações das plantas.....	61
3.8.1 Inventário Florestal.....	61
3.9 Análise estatística	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração	65
4.2 Atributos físicos do solo.....	80
4.2.1 Parâmetros físico-hídricos do solo em diferentes estados de compactação do solo.....	81
4.3 Indicadores de qualidade física do solo	93
4.3.1 Intervalo hídrico ótimo	93
4.3.2 Indicadores de qualidade física e estado de compactação do solo	106

4.3.3 Densidade máxima e umidade ótima de compactação.....	110
4.3.4 Relação do grau de compactação e densidade crítica do solo.....	115
4.4. Influência do estado de compactação na mobilização do solo.....	119
4.5 Crescimento inicial do <i>Eucalyptus saligna</i> Smith em função do tipo de preparo.	121
5 CONCLUSÕES	137
6 RECOMENDAÇÕES	139
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	141
APÊNDICES.....	159
ANEXOS.....	173

1 INTRODUÇÃO

A demanda global por produtos florestais cresce a cada ano e à medida que as florestas e as plantações florestais se consolidam como uma importante fonte de energia e renda, as empresas do setor expandem suas áreas, visando suprir a necessidade de mercado.

No Brasil, a expectativa é expandir as áreas de plantios para fins industriais em 45%, passando dos atuais 2,2 milhões de hectares para 3,2 milhões de hectares, até 2020 (CARVALHAES, 2013).

Em 2012, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.664.812 ha, sendo 76,6% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* (5.102.030 ha), apresentando um crescimento de 4,5% (228.078 ha) frente ao indicador de 2011. O principal fator que alavancou esse crescimento foi o estabelecimento de novos plantios frente à demanda futura dos projetos industriais do segmento de Papel e Celulose. Este segmento concentra 72,5% da área plantada no país (ABRAF, 2013), e é através do manejo florestal sustentável, juntamente com o desenvolvimento tecnológico e genético, que o Brasil atingiu competitividade global do setor e alcançou posição de destaque entre os principais produtores mundiais.

No entanto, com a expansão da produção florestal no Rio Grande do Sul, nesta última década, houve aumento na área de abrangência dos plantios florestais deste estado, passando a ocupar regiões anteriormente utilizadas com pecuária e cultivos agrícolas. Algumas dessas áreas onde se estabeleceram os plantios florestais apresentam problemas na estrutura do solo, os quais dificultam muitas vezes as atividades silviculturais.

Essas regiões são carentes de estudos que avaliem as condições de seus solos e necessitam de pesquisas que contribuam para o desenvolvimento de tecnologias de manejo, visando à garantia do pleno estabelecimento dos plantios de *Eucalyptus* sp., bem como o uso do solo de forma sustentável. Uma vez que, a produtividade florestal é influenciada pelos fatores edáficos e, no caso do *Eucalyptus* sp., os atributos físicos do solo são os que mais se destacam, sendo de vital importância para a planta, pois afetam diretamente o seu crescimento.

Estes atributos são de extrema importância, pelo fato de que, segundo Ferreira (1993), os constituintes sólidos do solo interagem com os fluídos água e ar.

A disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência mecânica do solo são os fatores físicos inter-relacionados que mais afetam o desenvolvimento do *Eucalyptus* sp. Assim através da interação desses fatores podemos avaliar a qualidade do solo ou a sua capacidade de fornecer o meio adequado para o seu desenvolvimento.

No entanto, em condições de campo, a avaliação da qualidade do solo em relação à compactação torna-se difícil, uma vez que a detecção das camadas adensadas ou compactadas que poderão restringir o desenvolvimento das raízes podem variar com a umidade no perfil do solo em poucos dias. Essas variações na umidade do solo promovem alterações na aeração e na resistência à penetração de raízes, uma vez que estes fatores estão relacionados com complexas interações que atuam simultaneamente (SILVA, 2009).

Um dos indicadores que pode ser usado como ferramenta para avaliar a qualidade do solo e ser decisivo para o manejo do solo, utilizando índices integrados de qualidade de solo, é o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A partir deste, é possível determinar o grau de compactação de um determinado solo e a densidade do solo crítica (Dsc); ou seja, aquela densidade em que ocorrem limitações severas ao desenvolvimento de plantas associadas à qualidade física do solo (SOUZA, 2002).

Caracterizado como a faixa de umidade ideal para o crescimento de plantas, o intervalo hídrico ótimo do solo é fortemente dependente da condição estrutural do solo, principalmente de sua densidade, uma vez que, com a elevação da mesma, há uma redução do espaço poroso destinado à aeração e aumento da resistência mecânica do solo. Assim, serve como indicador da qualidade do solo para o manejo sustentável de sistemas florestais, pois pode quantificar a qualidade estrutural do solo já que é sensível as alterações induzidas pelas práticas de manejo (SILVA et al., 2002).

A avaliação da qualidade física do solo é baseada em análises quantitativas de propriedades isoladas. Entretanto, é a interação entre estas propriedades que determina a qualidade do solo (SILVA, 2009).

Assim, de posse dessas informações será possível fazer uma avaliação em cada tipo de solo para determinar o seu preparo, monitorar a umidade ótima para a realização de operações florestais e monitorar continuamente seu impacto na qualidade física dos solos.

1.1 Hipótese

As hipóteses testadas no presente estudo são:

1. O conhecimento da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração, através do emprego de ferramentas de geoestatística, permite visualizar pontos críticos de resistência a penetração em diferentes profundidades e elaborar mapas de distribuição espacial, favorecendo a tomada de decisão quanto à profundidade de preparo de solo.
2. A compactação do solo oferece maior resistência ao crescimento radicular das plantas e aumenta a retenção de água no solo, mas reduz a disponibilidade de água às plantas.
3. O intervalo hídrico ótimo (IHO), faixa de umidade não limitante ao crescimento, é limitado mais fortemente pela resistência à penetração do que pela aeração do solo, especialmente em solos mais argilosos.
4. O solo mais argiloso das áreas estudadas apresenta a densidade do solo próxima da densidade crítica (Dsc), com base no IHO, requerendo assim maior cuidado na definição do tipo de preparo de solo para a implantação florestal.
5. O volume de solo mobilizado no preparo de solo varia em função do estado de compactação do solo.
6. O preparo do solo com maior volume de solo mobilizado é o que melhor favorece a sobrevivência e desenvolvimento do *Eucalyptus saligna* Smith.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do estudo foi gerar recomendações de preparo do solo, para cada tipo de solo, com base nos indicadores de qualidade (IHO e Dsc) visando à manutenção da qualidade do solo.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- a) Determinar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em algumas áreas destinadas ao plantio de *Eucalyptus saligna* Smith no Rio Grande do Sul.
- b) Avaliar o armazenamento e a disponibilidade de água nos estados de compactação.
- c) Determinar e avaliar os valores de densidade do solo (Densidade crítica) na qual a retenção de água no solo, a aeração e a resistência mecânica do solo à penetração começam a ser limitantes em cada tipo de solo.
- d) Determinar e avaliar o intervalo hídrico ótimo nos principais tipos de solos destinados ao cultivo de *Eucalyptus saligna* Smith.
- e) Determinar a densidade máxima do solo e a umidade ótima de compactação dos três solos avaliados neste estudo.
- f) Avaliar qual o preparo do solo que apresenta o maior volume de solo mobilizado.
- g) Avaliar qual o preparo de solo que favorece a sobrevivência e desenvolvimento inicial do *Eucalyptus saligna* Smith.
- h) Gerar recomendações adequadas de preparo do solo, para cada tipo de solo, visando à manutenção da qualidade do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gênero *Eucalyptus*: perspectiva do Brasil

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, é composto por mais de 700 espécies (SHARMA, 2006), distribuídas pelas mais variadas condições ambientais, tanto em termos de precipitação quanto de temperatura. Nativo da Austrália foi introduzido no Brasil no início do século XIX, com evidências de que as primeiras árvores teriam sido plantadas em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro (PEREIRA et al., 2000). Segundo Dossa et al. (2002), a produtividade do eucalipto pode ser considerada como um dos principais fatores que determinam sua expansão no mercado de papel e celulose, carvão e serraria.

As espécies de *Eucalyptus* economicamente importantes para as condições da Região Sul do Brasil constituem um pequeno número, sendo eles representados pelas espécies: *Eucalyptus dunnii*, *E. benthamii*, *E. saligna* e *E. Grandis* (FILHO et al., 2006).

A escolha do material genético depende das características do clima e do solo da região, da finalidade do plantio e da disponibilidade de mudas para aquisição. Atualmente tem havido preferência pelo plantio clonal, em virtude de seu maior incremento volumétrico, crescimento e uniformidade das plantas, controle de doenças e homogeneidade da matéria-prima (FONSECA et al., 2007).

2.1.1 Espécie *Eucalyptus saligna* SMITH

O *Eucalyptus saligna* é uma árvore alta, natural da Austrália (ORWA et al., 2009), que se destaca por apresentar elevado potencial de adaptação e crescimento (KIKUTI; NAMIKAWA, 1990). É uma das espécies mais estudadas e, de modo geral, apresenta características satisfatórias para emprego em diversos fins, especialmente para a indústria de celulose/papel, chapas de fibra e uso energético, entre outros (BERGER et al., 2002).

A espécie é típica de clima quente e úmido, onde a precipitação anual varia de 1.000 a 1.800 mm. Toleram solos moderadamente férteis, com boa retenção de umidade, porém devem

ser bem drenados. É considerada relativamente exigente em termos nutricionais (BARROS; NOVAIS, 1990).

O *Eucalyptus saligna* é frequentemente confundido com *E. grandis*, porém, produz madeira de maior densidade e apresenta menor susceptibilidade à deficiência do elemento mineral boro. A maior sensibilidade ao frio em relação a *E. dunnii* limita os plantios dessa espécie, sendo considerada apta para a região de transição entre clima tropical e subtropical (FILHO et al., 2006), no entanto, não tolera condições de seca prolongada (GONZAGA, 1983).

Esta espécie provou ser altamente adequada para plantações de curta rotação e, devido seu rápido crescimento, é uma árvore exigente em luz e altamente sensível à concorrência de ervas daninhas durante os primeiro dois anos. No entanto, devido a seu rápido crescimento inicial domina a vegetação concorrente (ORWA et al., 2009).

Em seu local de origem, a espécie se desenvolve melhor em neossolos flúvicos (solos aluviais) de boa qualidade, do tipo areno-siltoso. Outros solos são os argissolos e os solos formados a partir de rochas de origem vulcânica. De forma geral, os solos na região de origem da espécie possuem boa capacidade de retenção de água, porém, são bem drenados (BOLAND et al., 1984).

2.2 Fatores do solo ligados ao crescimento do Eucalipto

O crescimento observado de uma árvore ou povoamento florestal é resultante de processos fisiológicos, que são condicionados por um complexo de fatores biológicos (variabilidade genética, densidade do povoamento, competição entre plantas, intensidade de doenças e pragas) e ambientais (clima, fisiografia e solo). Quando os fatores climáticos e fisiográficos se mantêm constantes, mediante procedimento adequado de estratificação, as propriedades do solo se convertem no fator principal do ambiente físico, que tem uma relação apreciável com o crescimento da árvore (RALSTON, 1967).

No Brasil, a grande maioria das áreas sob reflorestamento é constituída por solos naturalmente pobres, uma vez que, o plantio de eucalipto demanda extensas áreas, o que muitas vezes implica na aquisição de terras mais baratas e, conseqüentemente, com maiores limitações (CARMO et al., 1990).

A condição oferecida para um bom crescimento inicial do *Eucalyptus* reflete diretamente na qualidade do povoamento florestal (GIOVELLI et al., 2001). Assim, para o pleno estabelecimento das espécies florestais, é necessário que o solo permita o crescimento das raízes, o fornecimento de água e nutrientes e as trocas gasosas (CLEMENTE et al., 2005). Santana (1986) em seu estudo, na região do Médio Rio Doce, em Minas Gerais, verificou que o *Eucalyptus saligna* apresentou, maior produtividade nos solos distróficos (latossolos) dos topos das elevações, em relação aos solos mais férteis das encostas e das baixadas da região (argissolos). Tal fato é explicado pela elevada densidade do solo nas partes mais baixas da paisagem, o que dificultou o crescimento do sistema radicular em profundidade, fato crítico em uma região de marcante período seco. Assim, a existência de impedimentos físicos no solo, que dificultam a penetração de raízes, aumenta os riscos de estresse hídrico das plantas (GATTO et al., 2003).

Neste contexto cabe ressaltar que o regime hídrico do solo é essencial para o crescimento de espécies de Eucalipto (LEITE, 1996). Corrêa Neto et al. (2007), observaram para *E. urophylla*, aos dois anos de idade, maior área basal e árvores de maiores diâmetros no terço inferior de uma encosta, onde o solo teria maior quantidade de água disponível, em função da maior proximidade do lençol freático com a superfície.

No entanto, a umidade do solo é condição essencial para o crescimento das plantas, não só pelo fornecimento de água, mas também pela mobilização e absorção dos nutrientes e pela sua influência na atividade da fauna (MORRIS et al., 2006).

A absorção de nutrientes pelas plantas depende do crescimento e eficiência das raízes e da disponibilidade de nutrientes no solo. A disponibilidade é influenciada pela compactação do solo, já que os processos de fluxo de massa e de difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, dependem da condição física do solo, particularmente de sua densidade (NOVAIS; SMYTH, 1999). A inibição na extensão de raízes em solos compactados está relacionada com vários fatores. Em solos secos, o aumento da resistência mecânica e o decréscimo do potencial de água no solo podem ser mais importantes. Em contrapartida, em solos úmidos, a deficiência de oxigênio e a acumulação de CO₂, etileno e fitotoxinas são os fatores principais (CONLIN; DRIESSCHE, 1996; MARSCHNER, 1995). Quando a concentração de O₂ é muito baixa, pode ocorrer redução na pressão de turgescência da célula ou, mesmo, maior resistência da parede celular ao alongamento (BORGES et al., 1997). Oberhauser et al. (2002), em experimento de compactação de dois Latossolos com diferentes umidades, verificaram que houve decréscimo da produção de matéria seca e do comprimento radicular de *Eucalyptus grandis*, cujos efeitos negativos foram mais

pronunciados nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo durante a compactação. Tonini et al. (2006), verificaram que diferentes padrões de crescimento em altura dominante de três materiais genéticos de *E. saligna*, aos três anos de idade, estavam relacionados com os tipos de solos analisados.

Contudo, verificamos que a produtividade das plantações de eucalipto em regiões tropicais é geralmente limitada pelos fatores edáficos e climáticos (STAPE et al., 2004), e que a interação do genótipo com o ambiente é extremamente importante.

2.3 Compactação do solo

A compactação do solo é definida como um aumento da densidade do solo, causado pelo homem ou por animais, resultando no rearranjo das partículas (dos agregados) do solo e conseqüente redução da porosidade (REICHERT et al., 2010).

O tráfego de máquinas é considerado a principal causa da compactação do solo, que foi intensificada pela modernização da agricultura, com o aumento do peso das máquinas e equipamentos e pela intensidade de uso do solo. A extensão e a intensidade da compactação do solo vão depender da pressão exercida pelos pontos de apoio das máquinas e equipamentos, das suas cargas, do número de vezes que trafegam no terreno, da textura e da agregação do solo. Assim, o tráfego de máquinas e equipamentos de grande porte sobre a área de cultivo podem alterar sensivelmente as propriedades físicas do solo, principalmente quando estes estão com alta umidade, ocasionando a formação de camadas compactadas, tanto em superfície como em subsuperfície (RICHART et al., 2005).

No entanto, em áreas florestais, é possível que a profundidade de compactação seja maior do que em áreas agrícolas ou de pecuária. Isso ocorre porque o peso de máquinas é maior, o tráfego durante a colheita é mais intenso e há possibilidade de maior umidade do solo devido ao sombreamento causado pela espécie florestal e ao maior acúmulo de resíduos vegetais e de matéria orgânica no solo (REICHERT et al., 2007). Silva (2005), avaliando os efeitos da compactação sobre propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, e crescimento do eucalipto; bem como a influência da intensidade de trânsito e carga de madeira de um forwarder sobre a compactação do solo, concluiu que as modificações promovidas pela compactação na estrutura do solo, ocasionaram alterações nas propriedades físicas, químicas e microbiológicas, afetando os processos de transporte de água e nutrientes

no solo, a ciclagem de C e N e o crescimento e nutrição do eucalipto, sendo a umidade do solo e a intensidade de trânsito os principais fatores que ampliaram esses efeitos.

Em condições de elevada densidade natural ou pela compactação artificial, há um aumento na resistência à penetração, diminuição no desenvolvimento do sistema radicular e redução nas taxas de absorção de água, oxigênio e de nutrientes (TORMENA et al., 1998; KLEIN; LIBARDI, 2002), limitando assim o crescimento e desenvolvimento das plantas (REICHERT et al., 2003).

A elevada compactação do solo pode ter um forte efeito sobre a primeira fase de estabelecimento de plantas. Silva et al. (2002), observaram que a compactação do solo restringiu o crescimento e aumentou o diâmetro médio de raízes de eucalipto, além de reduzir o acúmulo de potássio na planta, a eficiência de utilização de K e da adubação potássica.

O grau de compactação do solo tem sido avaliado principalmente pela sua densidade (CALVICHIOLO et al., 2003; CECHIN, 2007; REICHERT et al., 2009; SAMPIETRO, 2013) ou pela resistência do solo a penetração (DEDECEK et al., 2000; CALVICHIOLO et al., 2003; SILVA, 2003). A resistência do solo à penetração tem sido frequentemente utilizada como indicador da compactação do solo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (TORMENA; ROLOFF, 1996; MERCANTE et al., 2003). No entanto, a densidade do solo, embora também seja muito utilizada, fica complicado relacionar com o crescimento vegetal, pois ela varia de solo para solo, principalmente em função da textura (SÁ et al., 2005), dificultado o estabelecimento de densidades críticas.

Estudos de compactação do solo têm demonstrado que diferentes classes de solos apresentam comportamentos distintos quando submetidos ao processo de compactação, devido a vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, teor de matéria orgânica, umidade (RICHART et al., 2005). Portanto, o estudo da compactação em diferentes classes de solos, em diferentes sistemas de manejo e com diferentes graus de umidade é de grande importância (RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2009; LUCIANO et al., 2012; SAMPIETRO, 2013).

2.4 Integração dos fatores físicos do solo com o crescimento de plantas

O desenvolvimento das plantas depende dos atributos físicos do solo, das variações de temperatura e do regime das chuvas. Por isso, embora um solo seja muito fértil devido à sua composição mineral, as plantas podem não se desenvolver satisfatoriamente por estresse hídrico.

A relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade florestal é concernente aos efeitos diretos e indiretos da deficiência de água no crescimento das árvores. Dentre esses efeitos, destacam-se: diminuição da taxa fotossintética, em razão do aumento na resistência estomática (VOSE; SWANK, 1994); diminuição do aporte nutricional às árvores, via fluxo de massa e difusão; diminuição na velocidade de mineralização da matéria orgânica; e em grau mais elevado de deficiência hídrica, o próprio colapso funcional em níveis citoplasmático e tissular (SANDS; MULLIGAN, 1990).

Algumas práticas de uso e manejo do solo alteram as propriedades físico-hídricas do solo, ocasionando assim, impactos na qualidade do solo, temporários ou permanentes. Essas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a resistência à penetração, a porosidade de aeração, tamanho e continuidade dos poros, retenção e disponibilidade de água, entre outras. Segundo Bertol et al. (2000), a magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo é determinada por condições climáticas, classe de solo, sistemas de rotação de culturas utilizados, tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e condição de umidade do solo em que são realizadas as operações de campo.

Assim, nesse contexto, tanto a compactação como o revolvimento do solo alteram as propriedades físico-hídricas do solo, e devido a essas modificações que o solo apresenta comportamento diferenciado em relação à resistência ao crescimento das raízes, às trocas gasosas e à retenção e disponibilidade de água.

Quando um solo é compactado, sua resistência é aumentada e a porosidade total é reduzida à custa dos poros maiores. Com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados, enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Consequentemente, o escoamento superficial da água pode aumentar e o crescimento das plantas pode ser reduzido em virtude da diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente (REICHERT et al., 2007). Por outro lado, o revolvimento do solo destrói a rede de poros

estruturais e bioporos do solo, principalmente os macroporos contínuos (LAMANDE et al., 2003).

A capacidade de armazenamento de água no solo tem um limite que é determinado por características físicas do solo, inerentes à sua composição e a fatores relacionados ao manejo. Quanto mais argiloso for o solo, maior quantidade de água ficará retida nele, em comparação a solos menos argilosos. Porém, a maior quantidade de água armazenada, muitas vezes não está disponível para as plantas, ou seja, o potencial matricial que essa água está adsorvida às partículas do solo é maior que a capacidade das plantas em extraí-la. Existe, portanto, diferença entre água armazenada no solo e água disponível para as plantas, pois, no solo, existe uma proporção de poros de pequeno diâmetro que retém a água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas (SILVA, 2003). Entretanto, é importante considerar também as diferenças na mineralogia do solo e sua grande influência na retenção e disponibilidade de água para as culturas. As variações na água disponível foram mais dependentes da relação entre o teor de areia e silte do que da argila. Além disso, afirmaram que os solos com maior relação silte/argila, menos intemperizados e com maior quantidade de argilominerais do grupo das esmectitas, apresentaram maior retenção e disponibilidade de água (REICHERT et al., 2009).

A retenção de água no solo pode ser descrita em diferentes tensões pela curva de retenção de água no solo (CRA). Esta curva é uma das principais propriedades físicas do solo e expressa a relação entre a energia com que a água está retida e o conteúdo de água no solo (SILVA et al., 2010).

A disponibilidade de água no solo às plantas é tradicionalmente compreendida e caracterizada através do conceito de água disponível. Segundo este conceito a água disponível é a quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). No entanto, segundo Klein (2012), nem toda a água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente é disponível as plantas. Carlesso (1995) e Jong van Lier (2010), contestam a maneira tradicional de avaliar a água disponível no solo, argumentando que o crescimento de plantas pode ser retardado antes que o ponto de murcha seja atingido, embora a extração de água pelas raízes possa continuar acima de $-1,5$ MPa, ou que as plantas podem extrair água do solo mesmo quando a umidade estiver acima da capacidade de campo.

Neste contexto, Silva et al. (2006), relatam que a tolerância ao estresse hídrico varia com a espécie vegetal. Por exemplo, algumas espécies de hortaliças podem apresentar estresse hídrico com o solo na capacidade de campo, enquanto espécies xerófitas possuem grande

tolerância ao secamento do solo. Porém, é experimentalmente comprovado que a capacidade produtiva e o desenvolvimento das plantas são limitados à medida que a umidade do solo decresce, até que, num certo ponto, a planta murcha definitivamente. Nesse momento, o solo atingiu o ponto de murcha permanente. A partir desse ponto, a água no solo é considerada não disponível às plantas. Apesar do limite inferior de disponibilidade de umidade do solo ser variável com a espécie vegetal, existe boa correlação entre a umidade do solo no ponto de murcha permanente e o potencial mátrico de -1,5 MPa. Entretanto, segundo Carlesso (1995), o período de estresse hídrico pode ser ampliado ou reduzido pela condição estrutural do solo. Considerando que o limite inferior de disponibilidade hídrica é condicionado por características pedogenéticas do solo e o limite superior pela qualidade da sua estrutura, o sistema de manejo adotado e o grau de sua compactação podem interferir na entrada e na disponibilidade de água no solo.

A capacidade do solo em reter e disponibilizar a água são dependentes de suas características pedogenéticas, como a textura, mineralogia e profundidade efetiva e, também, da quantidade e geometria do sistema poroso (KAISER, 2010). No entanto, a qualidade do sistema poroso do solo não pode ser avaliada apenas através de seus volumes ou somente pela forma como os poros são distribuídos, também se deve considerar a capacidade em transmitir fluidos, como água ou gases (DORNER; HORN, 2009).

O teor de água no solo controla a aeração, a temperatura e a impedância mecânica, os quais são afetados pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros. Esses fatores juntos interagem e regulam o crescimento e funcionalidade das raízes, refletindo diretamente na produtividade (REICHERT et al., 2003).

Neste contexto, pode se dizer que o ambiente físico é o fator mais importante na produtividade do sítio, pois afeta propriedades do solo como o fluxo de água, ar e calor, a resistência do solo à penetração de raízes e a disponibilidade de nutrientes (LAL, 1979).

Os fatores físicos do solo, como a capacidade de retenção de água, a profundidade efetiva do horizonte A e o grau de desenvolvimento do perfil do solo, foram os que mais interferiram no crescimento de *Pinus taeda* (DOLDAN, 1990). Stape (2002), concluiu que o aporte hídrico foi o principal elemento controlador da produtividade do eucalipto (clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus uroplhylla*). Portanto, os desenvolvimentos dos plantios florestais apresentam forte dependência das disponibilidades hídricas e energéticas do meio ambiente (SOUZA et al., 2006).

2.5 Indicador de qualidade do solo

O solo, do ponto de vista da Física do Solo é considerado um sistema trifásico muito heterogêneo. É composto por uma fase sólida que constitui a matriz do solo; a fase líquida, que consiste na solução do solo; e a fase gasosa, que é a atmosfera do solo (FERREIRA, 2010). As interações entre essas três fases do solo, são controladas pelos estresses advindos do manejo, e determinam os processos físicos, químicos e biológicos relacionados com a qualidade do solo (SILVA et al., 2002).

A qualidade do solo é a capacidade do solo de promover, ao sistema radicular, condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 1998). No entanto, Doran e Parkin (1994) definiram qualidade do solo como a aptidão do solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens.

No entanto, a estrutura do solo pode ser alterada pelas práticas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por meio das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes. Nesse contexto, a qualidade física e estrutural do solo é determinante para a produção de biomassa e a sustentabilidade dos sistemas florestais cultivados (SILVA et al., 2002).

Os atributos físicos do solo diretamente relacionados com o crescimento das plantas são: a retenção de água, a aeração e a resistência à penetração das raízes. Assim, um solo com boa qualidade física requer um balanço entre aeração e retenção de água, além de resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento das raízes (LETEY, 1985). O autor 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 descreve um conteúdo de água no solo, o qual relaciona a água disponível, aeração e resistência à penetração, que pode ser limitante ao crescimento das plantas. Nesse trabalho pioneiro, Letey (1985) buscou descrever a necessidade de se manejar o potencial hídrico, temperatura, aeração e resistência à penetração quando se deseja obter boas produtividades. Posteriormente, Silva et al. (1994) aprimoraram o conceito do NLWR para “*Least Limiting Water Range*” (LLWR) como conteúdo de água em que são mínimas as limitações para o crescimento das plantas, considerando o potencial matricial, porosidade de aeração e resistência à penetração. Orellana et al. (1997) traduziram o conceito introduzido por Letey,

para *Intervalo Hídrico Ótimo* (IHO). No Brasil, Tormena et al. (1998) introduziram o conceito de IHO através de um estudo feito em um Latossolo Roxo de textura muito argilosa, na região de Guaíra, SP.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um moderno indicador da qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas (PETEAN et al., 2010). Segundo Reichert et al. (2003), o IHO significa um grande avanço em termos de biofísica do solo, pois integra num só índice os quatro fatores relacionados diretamente com o crescimento das plantas (porosidade de aeração (Ar) superior a 10%, água no solo a tensões entre a capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) e teor de água quando a resistência mecânica (RP) do solo é inferior a 2 MPa) que são determinados pelas propriedades intrínsecas e pela estrutura do solo. Devido a essa característica, o IHO é considerado um indicador multifatorial da qualidade física do solo (SILVA et al., 2006; TORMENA et al., 2007).

Qualquer alteração significativa na estrutura dos solos afeta a disponibilidade de água, a difusão de O₂ e a resistência à penetração (SILVA et al., 2002). Nesse sentido, vários estudos vêm sendo realizados no Brasil, utilizando o IHO na avaliação da qualidade física do solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998, IMHOFF et al., 2001; SILVA, 2003; ARAUJO et al., 2004; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006; KAISER et al., 2009).

Com o aumento da Ds, geralmente ocorre redução do IHO, indicando que as condições físicas do solo vão se tornando limitantes às plantas com menor variação no conteúdo de água do solo. O valor de densidade do solo em que o IHO se iguala a zero (IHO=0) indica que, a partir dessa densidade, as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular. Esse valor de densidade é considerado como a densidade do solo crítica (Dsc) (PETEAN et al., 2010).

A densidade crítica (IHO=0) obtida por meio do IHO auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo e serve como um indicativo da qualidade estrutural do solo (KAISER et al., 2009). O IHO pode ser tratado como uma função de pedotransferência, em que a faixa ótima de umidade do solo para o crescimento das plantas depende da densidade do solo (Ds) (LEÃO et al., 2005).

Vários autores, trabalhando em solos com diferentes classes texturais e sistemas de manejo, verificaram a ocorrência da Ds maior do que a Dsc (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006; PETEAN et al., 2010), a qual geralmente estava associada com a RP > 2,0 MPa e, ou, com a porosidade de aeração do solo < 10 %.

Para a resistência do solo à penetração, um valor de 2 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o crescimento das raízes. Para espécies florestais, as indicações são de que o crescimento radicular é restritivo para valores de resistência entre 2,0-3,0 MPa (SILVA et al., 2002). No entanto, Leão et al. (2005) argumentam que, para a definição dos limites críticos do IHO, é recomendado que se estabeleçam os limites críticos conforme as condições experimentais e o conhecimento dos processos ou fenômenos envolvidos.

Os efeitos da compactação do solo no crescimento das espécies florestais podem resultar de uma complexa interação envolvendo disponibilidade de água e nutrientes, resistência à penetração e aeração do solo. É interessante notar que uma variação no conteúdo de água no solo modifica os valores dessas propriedades simultaneamente, refletindo no ambiente físico de crescimento das plantas. Alguns estudos já conduzidos demonstram que o IHO é positivamente correlacionado com o teor de matéria orgânica e, negativamente, com a compactação do solo (SILVA et al., 2002). Nesse contexto, segundo Silva et al. (2009), solos estruturalmente pobres foram relacionados com um estreito IHO, requerendo um manejo cuidadoso, enquanto outros com boas condições estruturais apresentaram um IHO mais amplo, necessitando de um manejo relativamente menos cuidadoso.

A qualidade física de 4 solos florestais, cultivados com *Pinus radiata*, na Nova Zelândia, foi avaliada por Zou et al. (2000), em solos com ampla variação de textura e 3 níveis de compactação do solo. Os autores verificaram que o IHO foi reduzido com a compactação, embora a magnitude da redução dependesse da textura do solo. Destacam, ainda, que IHO foi sensível a variações nas práticas de manejo florestal e que este tem grande potencial como indicador das condições físicas do solo para o manejo florestal sustentável.

No entanto, segundo Gubiani et al. (2013), embora o intervalo hídrico ótimo (IHO) tenha sistematizado a relação entre compactação e fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento de plantas, sua eficiência para prever respostas biológicas, sobretudo a produção de grãos, ainda não foi comprovada. Para os autores, o crescimento de cada espécie vegetal é um processo com tempo de duração bem conhecido, em que os estresses físicos não são constantes e, por isso, não são adequadamente representados por propriedades físicas estáticas ou por medidas pontuais das propriedades físicas dinâmicas. Neste contexto, resultados de pesquisas em nível celular indicaram que os níveis de estresses hídricos e mecânicos que ocorrem nas raízes durante o secamento do solo são parcialmente representados pelo IHO. Assim sendo, se faz necessário o refinamento dos limites do IHO e o desenvolvimento de novos índices, com capacidade de integrar a variação dos fatores físicos

do solo ao longo do ciclo de crescimento das plantas, determinados por fatores meteorológicos.

No entanto, no Brasil, a cada ano, pesquisadores da área florestal vêm procurando indicadores de qualidade do solo de fácil mensuração, que permitam a comparação de diferentes condições de clima, solos e cultivo, e que sirvam como critérios de sustentabilidade para sistemas florestais. A evolução constante dos métodos produtivos, a racionalização de custos de produção e o aumento da produção têm justificado a elevada demanda por pesquisas e desenvolvimento tecnológico.

2.6 Preparo do solo

Visando suprir a demanda do mercado, empresas florestais tem como princípio básico produzir, através dos plantios florestais, a maior quantidade de madeira por unidade de área, no menor tempo possível e com alta qualidade. Buscando alcançar seu objetivo, elas investem em atividades de silvicultura, como técnicas de preparo de solo, adubação e condução de povoamentos florestais, com vistas ao ganho em produtividade.

No entanto, para a prática de uma silvicultura sustentável é necessário um adequado aproveitamento do solo. Sua utilização deve ser de acordo com a sua capacidade de uso, que leva em conta a qualidade do solo (MORALES, 2007). Assim, o grande desafio do manejo do solo consiste em identificar o equilíbrio entre estratégias e métodos silviculturais que mantenham ou elevam a produtividade em longo prazo, sem ou com mínimos impactos negativos ao ambiente (PREVEDELLO, 2008).

O crescimento radicular e a produtividade do eucalipto são influenciados pela compactação do solo (SILVA et al.,2006). Embora uma grande parte dos solos compactados sejam de origem antrópica, solos com campos naturais também podem apresentar compactação natural.

Quando a compactação do solo começa a limitar o crescimento e o desenvolvimento das culturas, tornam-se necessárias medidas recuperadoras com o objetivo de romper a camada compactada (PEDROTTI; DIAS JUNIOR, 1996).

Nesse cenário, o preparo de solo visa, por meio da ruptura do solo, diminuir a resistência e facilitar o desenvolvimento do sistema radicular das árvores, que passam a explorar maior volume de solo, aumentando sua absorção de água e nutrientes (FINGER et

al., 1996; STAPE et al., 2002) e também eliminando plantas indesejáveis próximas das mudas, evitando a competição (GATTO et al., 2003). Assim, em áreas florestais, com o revolvimento do solo, a compactação é eliminada até a camada de ação dos implementos; porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece (REICHERT et al., 2007).

O preparo do solo para o plantio florestal influencia o crescimento das mudas, principalmente nos estágios iniciais, e a uniformidade futura e produtividade da floresta (SASAKI et al., 2002). Para Gonçalves et al. (2000) e Gonçalves et al. (2002), o preparo do solo afeta o crescimento florestal e sua produtividade final por atuar diretamente sobre os fatores físicos, químicos e biológicos do solo e sobre a comunidade vegetal infestante, alterando a disponibilidade de recursos hídricos e nutricionais às plantas.

No entanto, a atividade de preparo do solo varia de acordo com a finalidade e com as características dos solos, clima, plantas daninhas e resíduos vegetais. Rodigheri e Pinto (2001) observaram o efeito do preparo do solo sobre a produtividade de diferentes espécies de eucalipto, ao testarem o crescimento dessas espécies em sítios com e sem preparo do solo. Na análise dos resultados de todas as espécies, o crescimento médio nos tratamentos com preparo do solo foi 67 % maior. Entretanto, segundo Gonçalves et al. (2002), o efeito do preparo do solo não depende apenas do implemento empregado, mas também da forma e intensidade de seu uso, pois, às vezes, o efeito benéfico de determinado implemento é anulado pelo seu uso inadequado ou excessivo.

Trabalhando com a avaliação da qualidade do preparo do solo em áreas de *Eucalyptus* sp., plantado no sistema de cultivo mínimo do solo, Gava (2003) observou que o tipo de solo e sua condição, representados pelo sítio e linha de plantio amostrado, interagiram com o fator subsolagem, produzindo resultados diferentes para a operação de preparo de solo. Isso sugere que a intensidade de preparo e o tipo de equipamento utilizado sejam especificados para cada tipo de solo, implicando na realização de um cultivo mínimo específico para cada situação.

Dentre as diversas opções de preparo, a subsolagem tem se consolidado na área florestal, devido aos seus efeitos benéficos sobre o solo e às suas vantagens operacionais e econômicas (SASAKI; GONÇALVES, 2005). Com isso, atualmente tornou-se uma operação padrão, empregada na maioria das empresas florestais. A função da subsolagem é “afofar” o solo de modo a facilitar a abertura de covas para o plantio e agilizar o crescimento em profundidade de raízes, o que acelera a autonomia e reduz o estresse hídrico das mudas na fase inicial de crescimento (SASAKI et al., 2002).

Efeito positivo da subsolagem no crescimento inicial do *E. grandis* foi verificado por Finger et al. (1996) em um solo Argissolo com presença de camada de impedimento. Observaram aumento em diâmetro e altura no solo subsolado em relação ao não preparado, de cerca de 50 e 35 %, respectivamente.

Quanto mais profunda for à subsolagem maior é a mobilização do solo (SASAKI, 2000). Dessa forma, é preciso determinar qual o volume de solo que deve ser preparado para o adequado estabelecimento do sistema radicular (SASAKI et al., 2002). O volume de solo mobilizado é dependente do tipo de preparo, do equipamento utilizado, da profundidade e das características do solo (STAPE et. al., 2002; SOUZA, 2002). Conforme Gonçalves et al. (2002), o efeito desse implemento no solo é muito variável, mas, em geral, para uma profundidade de preparo de 40 cm o subsolador mobiliza um volume de solo de aproximadamente 531 m³ ha⁻¹. Trabalhando com *Eucalyptus grandis*, Bentivenha (2003) verificou que a elongação radicular, nos estágios iniciais de crescimento das plantas, foi muito favorecida com o aumento da profundidade de subsolagem.

Há, em geral, uma relação positiva entre o volume de solo preparado e o ritmo de crescimento das plantas (BAPTISTA; LEVIEN, 2010). Poynton (1965) conduziu um experimento demonstrando que o desenvolvimento de plantas de *Eucalyptus saligna* foi diretamente influenciado pela intensidade de preparo de solo até os 6 anos, após o plantio, e que o maior crescimento das plantas ocorreu onde houve maior intensidade de preparo de solo.

Apesar de representar um problema para o crescimento de florestas manejadas, os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento de eucalipto ainda são incipientes (SILVA et al., 2006). Assim, estudos feitos em condições mais controladas podem servir para avaliar os efeitos da compactação sobre o crescimento de raízes bem como o efeito do preparo no crescimento das plantas e no desenvolvimento da parte aérea e sua relação com a nutrição das plantas.

2.7 Fertilidade do solo e a nutrição de plantas

A sustentabilidade produtiva dos sítios florestais apresenta-se como um dos desafios da silvicultura. A rápida taxa de crescimento das florestas plantadas, no Brasil, impõe elevada demanda sobre os recursos do solo, em especial água e nutrientes (BELLOTE et al., 2008).

Diversos elementos químicos são indispensáveis à vida vegetal, já que sem eles, as plantas não conseguem completar o seu ciclo de vida. Do ponto de vista fisiológico, todos os elementos essenciais são nutrientes (RAIJ, 1991).

De acordo com Malavolta et al. (1997), fatores internos e externos modificam a velocidade de absorção dos nutrientes. Um dos fatores externos é a disponibilidade dos elementos, a qual é influenciada pela umidade, aeração, matéria orgânica e o pH e consideram que esse último seja o fator que, isoladamente, mais influencia a disponibilidade de nutrientes.

Características químicas do solo que determinam os níveis da fertilidade podem ser usadas no estudo das relações sítio-planta. Todavia, devido às variações climáticas e às técnicas silviculturais a que os povoamentos estão sujeitos, deve-se ter bastante cuidado nestas interpretações, pois a disponibilidade de nutrientes para as plantas é determinada tanto pela capacidade do solo de fornecer nutrientes, como pela capacidade da planta em utilizá-los (BRUN, 1979).

Para a boa nutrição das árvores é necessário balancear a sua demanda com a oferta de nutrientes, no tempo e no espaço, tarefa muito difícil em ciclos curtos (BARROS et. al. 2000). Assim, devemos ter informações sobre a demanda de nutrientes da planta para atingir a produção esperada e a quantidade de nutrientes que pode ser suprida pelo solo. No entanto, cada nutriente tem sua dinâmica própria no solo, na planta e na atmosfera.

Um componente chave de quase todas as avaliações de qualidade do solo é a matéria orgânica e é, sem dúvida, importante para manter a produtividade em longo prazo. (VANCE, 2000). Segundo Reichert et al. (2003), é um dos melhores indicadores de qualidade do solo, pois se relaciona com inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas. Do ponto de vista físico, a matéria orgânica melhora a estrutura do solo, reduz a plasticidade e a coesão, aumenta a capacidade de retenção de água e a aeração, permitindo maior penetração e distribuição das raízes. Quimicamente, a matéria orgânica é a principal fonte de macro e micronutrientes essenciais às plantas, além de atuar indiretamente na disponibilidade dos mesmos, devido à elevação do pH; aumenta a capacidade de retenção dos nutrientes, evitando perdas. Biologicamente, a matéria orgânica aumenta a atividade dos microorganismos do solo, por ser fonte de energia e de nutrientes (KIEHL, 1985).

A fertilidade do solo está diretamente relacionada com a quantidade de matéria orgânica. Um exemplo disso é o fato de que a matéria orgânica do solo possui o poder de adsorver ou reter nutrientes, tais como potássio, cálcio, magnésio, manganês, ferro, cobre, zinco, amônio, sódio, etc., liberando-os posteriormente para as plantas (RICCI, 2006). No entanto, os desequilíbrios das proporções nutrientes no solo podem causar deficiência ou

excesso de nutrientes, causando limitações ao crescimento das plantas ou mesmo sua morte (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). Contudo, o correto diagnóstico dos fatores nutricionais que limitam a produtividade florestal pode levar a um manejo mais adequado, promovendo importante redução nos custos da exploração florestal, na medida em que possibilita maior eficácia na intervenção a ser feita sobre o sistema (WADT et al., 1998).

Em solos sob cultivo de eucalipto no Brasil, têm sido verificados significativos decréscimos na disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente de K, Ca e Mg (LEITE, 2001), que podem comprometer, dessa maneira, a sustentabilidade da produção florestal, caso não seja feita a reposição desses nutrientes mediante fertilização. Neste contexto, em um levantamento realizado por SILVEIRA et al. (1995), sobre a ocorrência de deficiências nutricionais em florestas plantadas com *Eucalyptus* de 22 empresas reflorestadoras apontaram que as deficiências de K, P, e B foram as mais frequentes.

Embora tenham sido realizadas inúmeras pesquisas sobre nutrição florestal, este assunto ainda necessita de atenção no que se refere à interação genótipo/ambiente, uma vez que estas informações são muito importantes para fornecer embasamento científico e técnico para a tomada de decisão operacional na área de silvicultura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas de estudo

O presente estudo foi realizado em três tipos de solo, da região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul, nos municípios de São Gabriel e Vila Nova do Sul, destinados ao cultivo de clones de *Eucalyptus saligna* Smith, pertencente à empresa Celulose Riograndense - CMPC.

As áreas estão inseridas na região fisiográfica da Depressão Central (FORTES, 1959), Unidade de Paisagem Natural DP2 (FEPAM, 2012).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 18°C e 1.355 mm, respectivamente (MORENO, 1961).

A primeira área experimental localiza-se na Fazenda Santa Amália (30°26'31" Sul e 54°21'24" Oeste), em São Gabriel, o solo é classificado como Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXE) (STRECK et al., 2008), de textura franca. Esta área encontrava-se em pousio há mais de um ano, com cobertura de *Baccharis* sp. (vassoura), *Eragrostis plana* (*Capim annoni*) e *Baccharis trimera* (carqueja), sendo seu uso anterior com culturas agrícolas (soja + azevém) e pecuária.

A segunda área experimental localiza-se na Fazenda Guatambú (30° 30' 0" Sul e 53° 53'30" Oeste), em Vila Nova do sul, o solo foi classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) (STRECK et al., 2008) de textura argilosa. Estava em pousio há mais de um ano, com cobertura de *Piptochaetium montevidense* (cabelo-de-porco), *Eryngium* sp. (gravatá), *Centela asiática*, *Paspalum notatum* (capim-forquilha), *Eragrostis plana* (*Capim-annoni*) e *Baccharis trimera* (carqueja).

A terceira área experimental localiza-se na Fazenda Vila Palma (30° 43' 37" Sul e 54° 14' 29" Oeste), em São Gabriel, o solo é classificado como Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) (STRECK et al., 2008) de textura franco arenosa. A área estava em pousio há mais de um ano, com cobertura de *Dodonaea viscosa* (vassoura-vermelha), *Piptochaetium montevidense* (cabelo-de-porco), *Eryngium* sp. (gravatá), *Senecio brasiliensis* (maria-mole),

Paspalum notatum (capim-forquilha), *Eragrostis plana* (Capim-annoni) e *Bacharis trimera* (carqueja).

As classes de solos estudadas foram classificadas conforme a classificação fornecida pela empresa (Tabela 1) e as análises químicas destes solos se encontram no Apêndice A.

Tabela 1 – Composição granulométrica dos solos estudados.

Classes de solo	Hz	Camada (m)	Areia		Silte gkg ⁻¹	Argila	Classe Textural
			Fina	Grossa			
SXe		0-10	302	100	443	155	Franca
		10-20	304	105	430	161	Franca
		20-40	308	97	395	199	Franca
		40-60	288	91	406	214	Franca
NVd		0-10	206	135	269	389	Argilosa
		10-20	195	251	257	427	Argilosa
		20-40	148	84	228	539	Argilosa
		40-60	167	74	199	559	Argilosa
RReh		0-10	658	56	171	114	Franco arenosa
		10-20	615	97	167	121	Franco arenosa
		20-40	558	159	162	120	Franco arenosa
		40-60	626	106	159	110	Franco arenosa

3.2 Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração

A distribuição e o agrupamento dos valores de resistência mecânica à penetração (RP) serviram de base para a caracterização inicial das três áreas experimentais.

Nas áreas de estudo foram demarcadas malhas regulares de 140 x 100 m (14000 m²), exceto na segunda área cuja malha regular foi de 125 x 100 m. A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em pontos distanciados entre si a cada 5 m com duas repetições, totalizando 609 pontos (Figura 1 e 2). Essa determinação foi feita com o auxílio de um penetrômetro digital (modelo Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer) de armazenamento eletrônico dos dados, possuindo ponta cônica com ângulo de penetração 30° e área basal de 129 mm², inserida no solo a uma velocidade de penetração de aproximadamente 1 m min⁻¹, sendo as leituras realizadas a cada 1,5 cm de profundidade até 60 cm. Concomitantemente às medidas de RP coletaram-se amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica.

Confeccionaram-se, primeiramente, mapas de isolinhas de resistência do solo à penetração das profundidades de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm, com uso do software GS+ 9.0 (Gamma Design Software, 1998), para verificar qual a camada com maior variação de estado de compactação. Com essa ferramenta foram ajustados para cada camada semivariogramas, testando modelos do tipo esférico, exponencial, linear e gaussiano. A escolha do melhor modelo teórico foi por meio do modelo de maior coeficiente de determinação (R^2) e grau de dependência espacial (DE) utilizando a técnica de validação cruzada, prosseguindo com krigagem dos dados e elaboração de mapas de isolinhas. Esses mapas serviram de orientação para as coletas e preparos de solo.

Posteriormente, os dados de RP foram submetidos à análise fatorial visando ao agrupamento dos dados em camadas compactadas por meio de análise multivariada, a qual foi executada conforme Manly (2008), onde as profundidades (total 39) constituíram as variáveis independentes (WEIRICH NETO et al., 2006; GUBIANI et al, 2010). Nesse caso, quando as variáveis recebem pesos altos na matriz de carregamento, as correlações são de grau elevado e as profundidades variam juntas, ou seja, existe a tendência de formação de uma camada que reúne várias profundidades. Para melhor nitidez da correlação entre as variáveis foi empregada a rotação Varimax, e o número de fatores foi definido com base no número de autovalores maiores que 1, conforme Manly (2008).

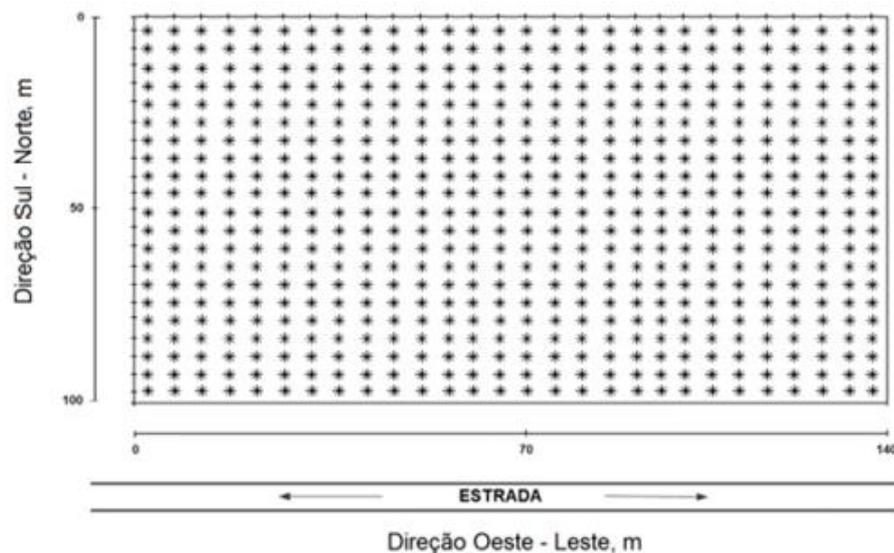


Figura 1 – Croqui dos pontos de resistência à penetração amostrados no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico em áreas de implantação, em São Gabriel, RS.

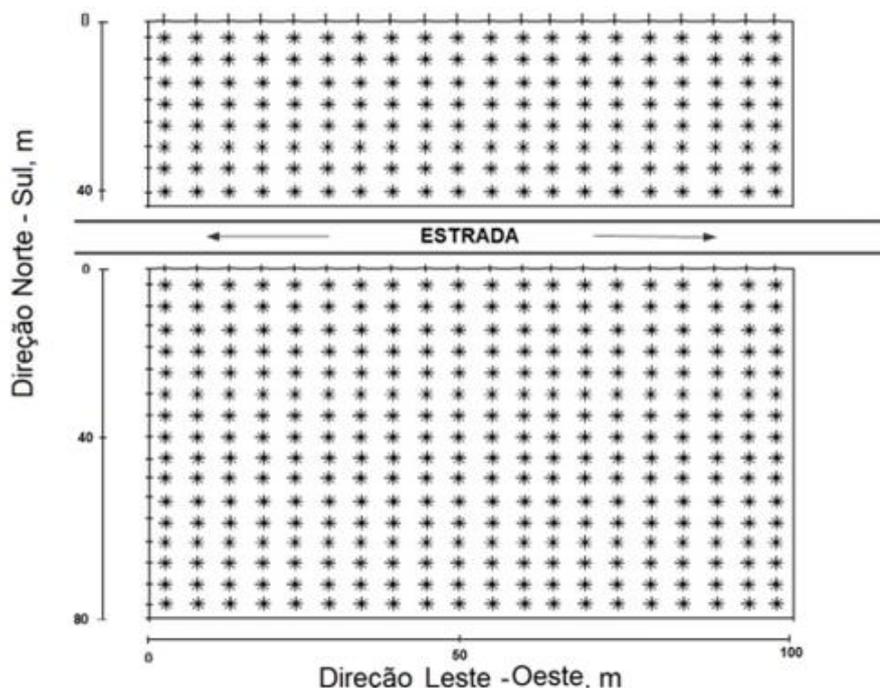


Figura 2 – Croqui dos pontos de resistência à penetração amostrados no Nitossolo Vermelho Distrófico típico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS.

Com os dados separados em camadas definidas, utilizou-se a estatística descritiva para estudar a tendência e dispersão dos dados, e também a forma de distribuição em cada camada.

Na sequência, novamente foram ajustados semivariogramas para cada nova camada, prosseguindo com krigagem dos dados e elaboração de mapas de isolinhas.

Nos mapas de isolinhas de RP, foram caracterizados três estados de resistência e, posteriormente, fez-se a distribuição de três parcelas amostrais de 30 x 30 m para cada EC (maior, intermediário e menor).

3.3 Procedimento amostral

Em cada uma das parcelas amostrais foram abertas trincheiras para coleta de amostras de solo, sendo este procedimento realizado em duas etapas: a primeira antes do preparo do solo e a segunda coleta seis meses após o preparo do solo (na linha de plantio) visando caracterizar e avaliar o efeito do preparo sobre a estrutura do solo.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada e preservada, nas camadas de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm. As amostras com estrutura não preservada foram destinadas para análise química do solo (pH em água, carbono orgânico total, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, boro, cobre, zinco, enxofre e alumínio), granulometria e ensaio de proctor, e as amostras de solo com estrutura preservada foram destinadas para as análises físicas do solo. As amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis volumétricos (5,7 cm de diâmetro por 4 cm de altura).

Para realizar a coleta, primeiramente foi aberta uma trincheira (Figura 3) de aproximadamente 1 m de profundidade. Após, procedeu-se a coleta das amostras preservada em diferentes patamares, na parte superior, média e inferior de cada camada, buscando uma melhor representatividade desta.

A amostragem foi realizada com nove repetições por profundidade, totalizando 108 amostras por estado de compactação e 324 amostras por área experimental.



(a)



(b)

Figura 3 – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a) e amostragem realizada (b).

As amostras com estrutura deformada foram coletadas com pá de corte, homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos.

As amostras foram individualmente acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria

(UFSM). No laboratório, as amostras foram divididas em grupos e, depois do preparo de rotina, foram conduzidas as análises.

3.4 Determinações

3.4.1 Determinações das propriedades físicas do solo

3.4.1.1 Granulometria e densidade de partículas

A composição granulométrica do solo foi determinada conforme o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), no qual foi quantificado o teor de argila (fração menor que 0,002 mm), o de silte (0,002 – 0,05 mm), o de areia fina (0,05 – 0,20 mm) e o de areia grossa (fração superior a 0,20 mm). As frações mais grosseiras foram separadas com peneira de 2mm.

3.4.1.2 Densidade, porosidade do solo, curva de retenção de água e conteúdo de água disponível

A densidade do solo foi determinada pelo método descrito pela EMBRAPA, (1997), onde amostras de solo com estrutura preservada coletadas em cilindros metálicos foram secas em estufa a 105°C, por aproximadamente 48 horas, até adquirirem peso constante e, posteriormente, foram pesadas.

A densidade de partículas pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006), sendo utilizadas para as determinações do solo proveniente das amostras não preservadas.

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e pesadas, obtendo-se, a umidade na tensão de equilíbrio de -0,006 MPa em mesa de tensão (REINERT; REICHERT, 2006), posteriormente, determinou-se a porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac) e microporosidade (Mic).

Para a determinação da curva característica de água no solo, as amostras, foram submetidas a potenciais de -0,006; -0,01 MPa em mesa de tensão, -0,033; -0,07; -0,1; -0,5, -1,0 MPa em membrana de Richards e a -1,5 MPa, foram usadas amostras com estrutura alterada, determinadas em potenciômetro de ponto de orvalho. Com os valores da umidade volumétrica do solo e o potencial matricial foi realizado o ajuste da curva de retenção da 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 1:

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

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

O conteúdo de água disponível (AD) no solo foi calculado pela subtração da umidade volumétrica do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), obtido na tensão de água de -0,01 MPa, pela umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), obtido na tensão de -1,5 MPa, de acordo com Moniz (1972).

3.4.1.3 Densidade máxima, umidade ótima de compactação e grau de compactação

A densidade máxima do solo ($D_{s_{MAX}}$) e a umidade ótima de compactação (U_{OC}) foram determinadas pelo ensaio de Proctor Normal. Este ensaio padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86) determina a relação existente entre a densidade, umidade e energia de compactação de um solo.

O grau de compactação (GC) foi calculado pela relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade máxima do solo ($D_{s_{MAX}}$), obtida pelo ensaio de Proctor Normal (HAKANSSON, 1990), utilizando a seguinte equação 2:

$$GC = \frac{D_s}{D_{sMax}} \times 100 \quad [2]$$

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.

3.4.1.4 Intervalo hídrico ótimo

O IHO foi determinado para cada amostra conforme método proposto por Silva et al. (1994). A umidade do solo para os valores críticos ao crescimento da cultura foi definida como: capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade do solo em que a resistência atinge 3,0 MPa (θ_{rp}) e umidade do solo em que a porosidade de aeração é de 10% (θ_{pa}). θ_{cc} e θ_{pmp} foram obtidos pela curva de retenção de água, θ_{rp} foi calculado pela curva de resistência do solo à penetração RP e θ_{pa} foi calculada através da subtração porosidade total - 0,1.

Para o limite inferior do IHO foi considerado a umidade volumétrica do solo na resistência do solo à penetração de raízes de 3 MPa (θ_{rp}) ou a quantidade de água no ponto de murcha permanente, considerada a umidade volumétrica do solo no potencial de -1,5 MPa ($\theta_{1,5}$).

Para o limite superior do IHO foi considerado umidade volumétrica do solo quando a porosidade de aeração é de 10 % (θ_{ar}) ou o conteúdo de água no solo na capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), considerada a água retida no solo no potencial de -0,01 MPa. 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.

Para a determinação da curva de resistência do solo à penetração, as amostras, foram submetidas a potenciais de -0,006; -0,01; -0,033; -0,07; -0,1; -0,5, -1,0 e -1,5 MPa. Imediatamente após atingir o equilíbrio, cada amostra foi submetida ao ensaio de penetração mecânica, empregando o penetrômetro de taxa constante de penetração, para obtenção da resistência do solo à penetração na umidade em que se encontravam.

A resistência do solo à penetração foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico, com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} e cone com diâmetro de base de 4 mm e ângulo de 30° . Esse penetrômetro é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados (TORMENA

et al., 1998). Realizou-se a determinação de resistência à penetração no centro de cada amostra, a cada 0,01 cm de profundidade, sendo calculada pelo valor médio ao longo da profundidade da amostra, descartando-se os extremos e *outliers*.

Após a determinação da resistência à penetração (RP), as amostras foram colocadas em estufa a 105°C para determinar a densidade do solo (Ds) e a umidade volumétrica (θ).

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

$$\theta = \exp(a + b * D_s) \Psi_m^c \quad [3]$$

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

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

$$RP = a * \theta^b * D_s^c \quad [4]$$

onde, os coeficientes *a*, *b* e *c* são parâmetros do ajuste.

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

Para obtenção dos parâmetros de estimativa do IHO, utilizou-se um algoritmo, por meio do programa estatístico SAS, que foi desenvolvido por Leão et al. (2005).

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; SAMPIETRO, 2013), o IHO foi determinado tendo como limite inferior o valor de RP igual a 3 MPa. No entanto, foram determinados IHOs também com RP crítica a 2 MPa ($D_{s_{cIHO_{RP2MPa}}}$) para posterior comparação.

3.4.2 Determinação das propriedades químicas do solo

Para certificar que os plantios não apresentam deficiências nutricionais e que o desenvolvimento inicial do *Eucalyptus saligna* é consequência do efeito do preparo de solo

empregado, realizou-se a análise química do solo em cada parcela de cada tratamento, dos diferentes solos, visando identificar alguma deficiência nutricional.

Para as determinações das propriedades químicas do solo, foi realizada a análise de pH em água, Co, P, K, Ca, Mg, S, Cu, B, Zn e Al. Estas determinações químicas seguiram a metodologia descrita em TEDESCO et al. (1995).

O P e K disponíveis foram obtidos pelo extrator de Mehlich.

3.5 Operações silviculturais

A instalação de cada experimento foi precedida pelo controle de formigas cortadeiras com uso de iscas formicida, na área do experimento e adjacentes, seguido de roçada mecânica e capina química em área total.

Em todas as parcelas, concomitantemente aos diferentes preparos do solo, foram incorporados ao solo 200 kg ha⁻¹ de superfosfato simples, conforme recomendação do centro de pesquisa e tecnologia (CPT) da empresa.

Em torno de 15 dias após o plantio, as mudas receberam uma nova adubação (adubação de arranque) com NPK (6-30-6) sendo 100 g por planta, distribuídos em duas covas laterais, distanciadas 10 a 15 cm de cada muda e a uma profundidade aproximada entre 6 a 8 cm. O replantio foi realizado 25 dias após o plantio.

Posteriormente, aos 6 meses foi realizada capina química em área total sendo precedida pela adubação de cobertura manual, utilizando com 150 g por planta de NPK (12-00-20) mais Boro a 0,7% por planta, conforme recomendação técnica.

3.6 Tratamentos

Os experimentos foram instalados em julho de 2011, no Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe), em setembro de 2011, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd), e em outubro de 2011 no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

O preparo do solo foi realizado utilizando um trator John Deere modelo 7515 (140 cv de potência), com subsolador de três hastes (uma central e duas hastes laterais menores) (Figura 4a).



Figura 4 – Implemento utilizado para subsolagem (a), subsolagem do solo concomitante a fosfatagem (b), confecção de camalhão (c), parcelas com e sem camalhão (d), medição das parcelas (e) e plantio das mudas (f).

A haste principal do subsolador possuía um comprimento de 1 m, e a largura da ponteira era de 11 cm. As hastes secundárias possuíam 50 cm de comprimento com ponteiras de mesma dimensão da haste principal. As hastes secundárias têm como função fechar o sulco aberto pela haste principal, por isso foram dispostas 50 cm atrás dela. A haste principal tem um ângulo de ataque de 20 a 25° e tem um ângulo de inclinação de 45° (Reta Inclinada) (Figura 4a).

A profundidade da subsolagem foi determinada em função dos resultados do monitoramento pré-plantio. Assim, com base nos resultados obtidos, foram realizados os seguintes preparos do solo: subsolagem a 50 cm de profundidade mais enxada rotativa (S50); subsolagem a 50 cm de profundidade mais camalhão (S50C); e subsolagem a 70 cm de profundidade mais enxada rotativa (S70). Foram implantadas 3 parcelas (30 x 30 m) em cada bloco, totalizando 9 parcelas por tipo de solo. Estas foram realizadas com umidade próximas a 70% da capacidade de campo nos solos mais arenosos (0,24 kg kg⁻¹ no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e 0,20 kg kg⁻¹ no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico) e 50% no mais argiloso (0,19 kg kg⁻¹; no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).

Após o preparo, foi realizado o plantio das mudas (Figura 4f), em espaçamento de 3,5 x 2,6 m, totalizando 96 plantas em cada parcela, distribuídas em 8 linhas com 12 plantas em cada linha. No entanto, somente as 60 plantas centrais foram consideradas nas avaliações dendrométricas; as demais foram deixadas como bordadura. Considerando uma área de 9,1 m² por planta, cada parcela ocupou uma área de 900 m², o que totaliza 0,81 ha de área experimental.

3.7 Mobilização do solo

Para determinar a área de solo mobilizado, foram abertas trincheiras onde se realizaram sondagens transversais e horizontais com o auxílio de uma faca, considerando-se área preparada àquela na qual apresentou menor resistência à penetração comparada a área não mobilizada. As medições foram feitas com fita métrica e utilizou-se também uma máquina fotográfica digital. Para o cálculo da área mobilizada, foi determinada a superfície de cada figura geométrica formada pela profundidade preparada utilizando-se o software Auto CAD 2011 (Release 18.0) (Computer Aided Design).

O cálculo do volume de solo mobilizado foi obtido convertendo a área média da seção transversal do sulco formado pela haste sulcadora de cm^2 para m^2 , a qual foi posteriormente multiplicada pelos 10.000 m^2 de um hectare, e dividido pelo espaçamento entre linhas, obtendo-se tal volume em $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

3.8 Avaliações das plantas

3.8.1 Inventário Florestal

A avaliação do desenvolvimento do eucalipto foi realizada através de medições de altura e diâmetro de todas as árvores das parcelas, com exceção das árvores da bordadura, aos 6, 12, 18 e 24 meses após o plantio de *E. saligna*.

De posse dos dados do inventário foi calculada a taxa de sobrevivência e estimada a área basal por hectare de cada parcela experimental, conforme Finger (1992).

a) Taxa de sobrevivência (S):

$$S = \frac{n_i}{n_e} \times 100 \quad [5]$$

Sendo: S= taxa de sobrevivência (%); n_i = número de árvores medidas; n_e = número de árvores esperadas.

b) Área basal por hectare (G):

A área basal individual das árvores foi obtida com a seguinte fórmula:

$$g_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad [6]$$

Sendo: g_i = área basal; d = diâmetro ao nível de Dap.

A área basal média das árvores (equação 7), na unidade experimental, foi obtida pela divisão do somatório das áreas basais da unidade experimental pelo número de árvores da unidade experimental:

$$g_i = \frac{\sum g_i}{n_i} \quad [7]$$

Sendo: g_i = área basal média da unidade experimental; $\sum g_i$ = somatório das áreas basais da unidade experimental; n_i = número de árvores da unidade experimental.

A área basal por hectare (equação 8), por unidade experimental (G_i), foi determinada pela multiplicação da área basal média individual (g_i) das árvores da parcela i pelo número de árvores por hectare da unidade experimental:

$$G_i = g_i * N_i \quad [8]$$

Sendo: G_i = área basal por hectare por parcela; g_i = área basal média da unidade experimental; N_i = número de árvores por hectare da unidade experimental.

3.9 Análise estatística

Os dados avaliados foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade e de homogeneidade de variância para verificar a adequação dos dados e posterior análise de variância. Para os que não apresentaram dados normais e homogeneidade de variância realizou-se transformação dos dados.

As variáveis de solo (Ds, PT, Macro e Microporosidade, CC, AD PMP) foram submetidas à análise de variância a 5% de probabilidade de erro, para as que se mostram significativas foram comparadas as médias entre os tratamentos. Utilizou-se o software ASSISTAT Versão 7.7 beta (SILVA, 2014) e o delineamento em blocos ao acaso para a análise dos dados de solo, para cada camada avaliada.

As variáveis de crescimento foram submetidas a testes em esquema de parcela subdividida no tempo, empregando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011). Realizou-se à análise de variância e na observância de resultado significativo realizou-se

comparação de médias entre os tratamentos pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, para o desdobramento dos tratamentos (preparo do solo) nas idades.

Para verificar se o volume de solo mobilizado foi influenciado pelo estado de compactação foi realizada a análise de agrupamentos (CA, Cluster Analysis) no software aplicativo SPSS 13.0 for Windows.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração

As camadas formadas pela análise fatorial são indicadas pelos pesos para os dados do Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXE) (Tabela 2), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) (Tabela 3) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) (Tabela 4).

O valor médio das camadas formadas pela análise fatorial quase se sobrepôs à linha dos pontos médios, o que significa que as camadas formadas preservam as diferenças marcantes originais do conjunto dos dados. Nem todas as profundidades foram agrupadas.

No Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXE) (Tabela 2) as profundidades 7,5; 9,0; 22,5; 24,0; 25,5; 43,5 e 45,0 cm não se correlacionaram em grau elevado com as profundidades adjacentes e, portanto, não participaram dos grupos formados. No Vermelho Distrófico típico (NVd), as profundidades que não se correlacionaram foram 6,0; 16,5; 18,0; 28,5; 30,0; 31,5; 33,0; 39,0; 40,5; 42,0; 43,5; 45,0; 46,5; 48,0 e 49,5 cm. Já no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) as profundidades que não se correlacionaram foram 7,5; 16,5; 18,0; 19,5; 21,0; 33,0; 34,5; 36,0; 37,5; 39,0; 40,5 e a 42,0 cm.

No SXE (Tabela 2), as trinta e nove profundidades foram reunidas em cinco fatores que somam 86% da variância dos dados, sendo que os fatores 1, 2 e 3 contribuem com parcela maior (variância relativa).

Os fatores 1 (profundidade de 46,5 – 58,5 cm), 3 (intervalo de 27,0 – 42,0 cm) e 4 (1,5 – 6,0 cm de profundidade) correspondem às camadas de incremento da compactação, enquanto que o fator 2 (10,5 – 21,0 cm) possui compactação uniforme (Figura 5). Entretanto, no NVd (Tabela 3) os cinco fatores somaram 76% da variância dos dados, sendo que os fatores 1, 2 e 3 também contribuem com parcela maior (variância relativa). No entanto, neste solo todas as camadas apresentam incremento da compactação com o aumento da profundidade (Figura 6).

Essa análise corrobora para que, antes da atividade de plantio de mudas de eucalipto, a área deverá ser preparada com subsolador a uma profundidade até 60 cm na linha de plantio (sistema de cultivo mínimo), para que as raízes da planta possam se desenvolver de maneira adequada e fazendo com que o plantio alcance a produtividade esperada.

Tabela 2 – Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe).

Profundidade (cm)	Fatores				
	1	2	3	4	5
1,5	-0,024*	0,028	0,111	0,862	-0,136
3,0	-0,056	0,121	0,092	0,923	-0,083
4,5	-0,080	0,225	0,036	0,918	0,002
6,0	-0,056	0,412	0,006	0,830	0,092
7,5	0,001	0,529	-0,014	0,635	0,197
9,0	-0,023	0,691	-0,040	0,555	0,194
10,5	-0,018	0,784	-0,025	0,456	0,171
12,0	-0,005	0,851	0,023	0,342	0,152
13,5	0,028	0,894	0,111	0,182	0,108
15,0	0,050	0,906	0,138	0,111	0,044
16,5	0,039	0,892	0,196	0,065	-0,037
18,0	0,054	0,886	0,278	0,063	-0,096
19,5	0,081	0,842	0,368	0,062	-0,162
21,0	0,085	0,788	0,454	0,061	-0,219
22,5	0,097	0,695	0,549	0,058	-0,293
24,0	0,115	0,645	0,606	0,057	-0,316
25,5	0,127	0,569	0,671	0,044	-0,341
27,0	0,135	0,456	0,746	0,041	-0,341
28,5	0,151	0,351	0,804	0,050	-0,296
30,0	0,142	0,299	0,842	0,056	-0,243
31,5	0,162	0,245	0,868	0,059	-0,175
33,0	0,201	0,183	0,892	0,055	-0,079
34,5	0,249	0,154	0,888	0,045	0,033
36,0	0,299	0,128	0,885	0,059	0,069
37,5	0,359	0,094	0,855	0,047	0,166
39,0	0,419	0,077	0,811	0,009	0,227
40,5	0,469	0,067	0,787	-0,023	0,252
42,0	0,554	0,061	0,710	-0,033	0,245
43,5	0,612	0,068	0,668	-0,021	0,235
45,0	0,672	0,034	0,592	-0,027	0,223
46,5	0,722	0,007	0,539	-0,021	0,219
48,0	0,819	0,020	0,433	-0,024	0,139
49,5	0,868	0,028	0,352	-0,041	0,093
51,0	0,879	0,019	0,293	-0,072	0,066
52,5	0,909	0,045	0,223	-0,031	0,013
54,0	0,914	0,073	0,170	-0,044	-0,081
55,5	0,902	0,064	0,125	-0,042	-0,154
57,0	0,875	0,038	0,122	-0,007	-0,187
58,5	0,857	0,048	0,103	0,001	-0,192
Variância Relativa	45,201	22,491	9,154	6,826	3,007
Variância	45,201	67,692	76,846	83,672	86,679

*Em negrito são destacados os carregamentos fatoriais acima de 0,700.

Tabela 3 – Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).

Profundidade (cm)	Fatores				
	1	2	3	4	5
1,5	0,085	0,138	0,132	0,049	0,893
3,0	0,089	0,315	0,089	0,072	0,898
4,5	0,093	0,502	0,070	0,072	0,793
6,0	0,083	0,654	0,052	0,069	0,630
7,5	0,079	0,795	0,061	0,085	0,448
9,0	0,049	0,870	0,105	0,085	0,264
10,5	0,048	0,870	0,189	0,086	0,214
12,0	0,076	0,854	0,315	0,098	0,182
13,5	0,085	0,786	0,401	0,125	0,094
15,0	0,094	0,757	0,515	0,099	0,065
16,5	0,094	0,683	0,587	0,104	0,048
18,0	0,130	0,616	0,668	0,125	0,027
19,5	0,166	0,497	0,717	0,139	0,034
21,0	0,151	0,364	0,792	0,151	0,076
22,5	0,145	0,276	0,783	0,190	0,078
24,0	0,125	0,276	0,777	0,287	0,075
25,5	0,110	0,213	0,751	0,329	0,120
27,0	0,141	0,156	0,714	0,456	0,131
28,5	0,134	0,153	0,632	0,520	0,135
30,0	0,171	0,111	0,551	0,570	0,121
31,5	0,145	0,146	0,478	0,628	0,078
33,0	0,161	0,142	0,398	0,628	0,063
34,5	0,205	0,126	0,388	0,741	0,055
36,0	0,237	0,136	0,264	0,750	0,018
37,5	0,297	0,119	0,288	0,718	0,106
39,0	0,286	0,075	0,227	0,699	0,090
40,5	0,388	0,122	0,187	0,668	0,062
42,0	0,446	0,104	0,167	0,680	0,046
43,5	0,478	0,095	0,154	0,629	0,013
45,0	0,557	0,104	0,104	0,636	0,044
46,5	0,614	0,080	0,063	0,495	0,040
48,0	0,654	0,072	0,082	0,492	0,044
49,5	0,668	0,064	0,122	0,413	0,054
51,0	0,759	0,073	0,158	0,348	0,055
52,5	0,734	0,081	0,145	0,291	0,086
54,0	0,830	0,057	0,136	0,234	0,090
55,5	0,839	0,102	0,166	0,195	0,120
57,0	0,827	0,064	0,095	0,068	0,046
58,5	0,833	0,106	0,086	0,058	0,055
Variância Relativa	43,914	15,718	8,439	4,751	2,965
Variância Acumulada	43,914	59,632	68,072	72,823	75,788

*Em negrito são destacados os carregamentos fatoriais acima de 0,700.

No Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) (Tabela 4), as trinta e nove profundidades foram reunidas em cinco fatores que somaram 82% da variância dos dados, sendo que os fatores 1, 2 e 3 contribuem com parcela maior (variância relativa).

Tabela 4 – Matriz de carregamentos, para as profundidades (variáveis) em cada fator, dos dados do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

Profundidade (cm)	Fatores			
	1	2	3	4
1,5	0,117	0,844	-0,001	0,164
3,0	0,154	0,895	0,135	0,111
4,5	0,172	0,838	0,251	0,059
6,0	0,139	0,775	0,451	0,085
7,5	0,188	0,613	0,569	0,039
9,0	0,253	0,371	0,750	0,031
10,5	0,206	0,200	0,812	0,149
12,0	0,216	0,175	0,853	0,247
13,5	0,184	0,149	0,805	0,339
15,0	0,196	0,125	0,753	0,451
16,5	0,192	0,103	0,686	0,521
18,0	0,288	0,094	0,621	0,571
19,5	0,313	0,103	0,533	0,615
21,0	0,341	0,085	0,461	0,656
22,5	0,281	0,068	0,330	0,747
24,0	0,361	0,063	0,308	0,761
25,5	0,432	0,105	0,243	0,745
27,0	0,492	0,085	0,282	0,700
28,5	0,465	0,080	0,226	0,746
30,0	0,491	0,127	0,239	0,716
31,5	0,542	0,122	0,213	0,703
33,0	0,567	0,121	0,215	0,656
34,5	0,553	0,106	0,203	0,642
36,0	0,624	0,152	0,168	0,608
37,5	0,629	0,120	0,168	0,611
39,0	0,644	0,127	0,177	0,603
40,5	0,651	0,122	0,118	0,590
42,0	0,699	0,079	0,152	0,565
43,5	0,720	0,089	0,135	0,532
45,0	0,779	0,110	0,166	0,477
46,5	0,772	0,137	0,146	0,475
48,0	0,835	0,117	0,182	0,366
49,5	0,857	0,128	0,173	0,334
51,0	0,882	0,105	0,191	0,248
52,5	0,892	0,117	0,187	0,241
54,0	0,898	0,106	0,176	0,201
55,5	0,898	0,102	0,197	0,206
57,0	0,890	0,117	0,187	0,212
58,5	0,880	0,132	0,168	0,214
Variância Relativa (%)	61,102	10,740	6,825	3,774
Variância Acumulada	61,102	71,842	78,667	82,441

*Em negrito são destacados os carregamentos fatoriais acima de 0,700.

Os fatores 1 (profundidade de 43,5 – 58,5 cm), 2 (intervalo de 1,5 – 6,0 cm), 4 (22,5 – 31,5 cm de profundidade) correspondem às camadas de incremento da compactação, enquanto que o fator 3 (9,0 – 15,0 cm) possui compactação uniforme (Figura 7).

Com a distribuição de todos os pontos amostrados, nos três tipos de solo, fica evidente a grande variabilidade da RP nas profundidades analisadas (Figuras 5, 6 e 7). Entretanto, a variação de umidade em profundidade foi pequena com média de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ no Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico, de $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$ no Nitossolo Vermelho Distrófico típico e de $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.

As linhas dos valores médios de resistência do solo (Figuras 5, 6 e 7) evidenciam a presença de camadas que sofreram de processos distintos no decorrer do tempo. No Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, na segunda camada percebe-se uma estagnação da RP, enquanto que nas demais aumentou com a profundidade do solo. Esse comportamento diferenciado, na segunda camada, pode ter relação com a atividade biológica (raízes, macro e micro fauna), ciclos de umedecimento e secagem, chamados todos, neste texto, de agentes descompactadores (GUBIANI et al., 2010), que podem ter igualado as forças com os agentes compactadores. As demais camadas indicam aumento da compactação, mostrando que as pressões confinadas nessa camada não são compensadas pela ação dos agentes descompactadores.

A média da RP para cada camada mostra que, no Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico, o limite inferior da terceira e quarta camada apresentam RP acima de 2 MPa. No Nitossolo Vermelho Distrófico típico, o limite inferior da terceira camada, a quarta e quinta camadas apresentam RP acima de 3 MPa. Já no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico a terceira e quarta camadas apresentam RP acima de 2 MPa. Essas RP são consideradas, por muitos autores, restritivas ao crescimento radicular.

A resistência do solo à penetração de 2 MPa, determinado na umidade a capacidade de campo (0,01 MPa), promove significativa restrição ao crescimento radicular de culturas em sistemas de preparo convencional (ARSHAD et al., 1996). Para Taylor et al. (1996) valores de RP de 2,0 MPa são considerados como crítico para o bom desenvolvimento radicular das plantas. No entanto, na literatura ainda há controvérsias a respeito do limite crítico de RP. Rosolem et al. (1999), relatam que a resistência à penetração da ordem de 1,3 MPa reduz, à metade, o crescimento das raízes seminais adventícias do milho, enquanto Materechera et al. (1991) verificaram redução na alongação radicular em 90 % e aumento do diâmetro das raízes em RP de 4,2 MPa. Para espécies florestais, as indicações são de que o crescimento radicular é restringido para valores de resistência entre 2,0 - 3,0 MPa (SILVA et al., 2002).

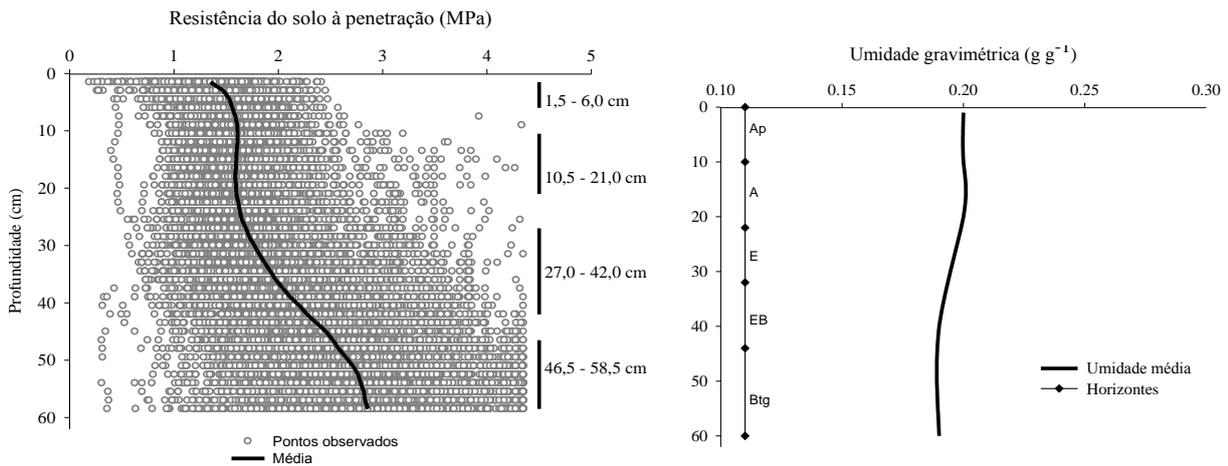


Figura 5 – Resistência do solo à penetração observada no Planosolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe) em área de implantação, em São Gabriel, RS.

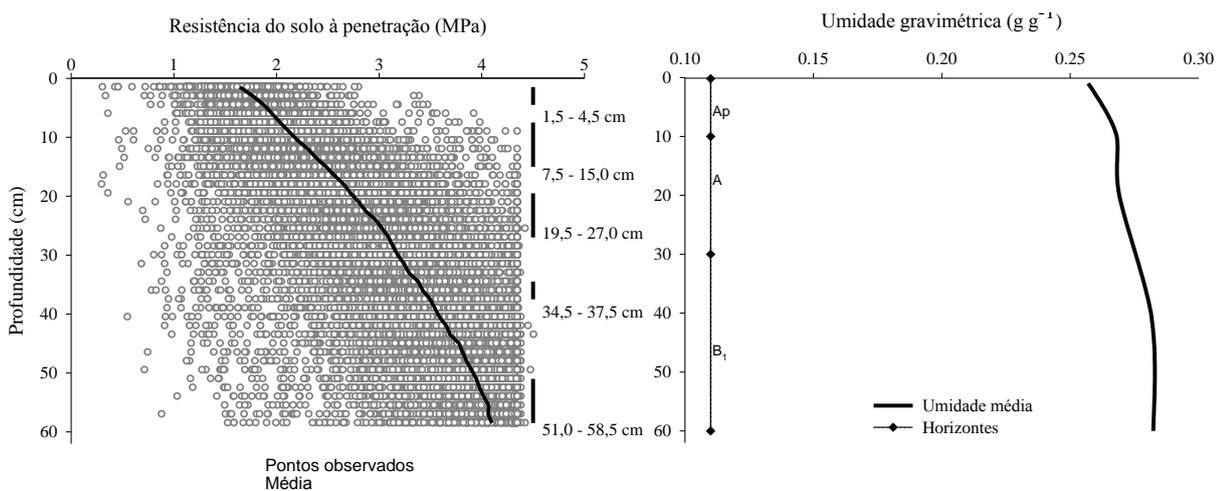


Figura 6 – Resistência do solo à penetração observada no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS.

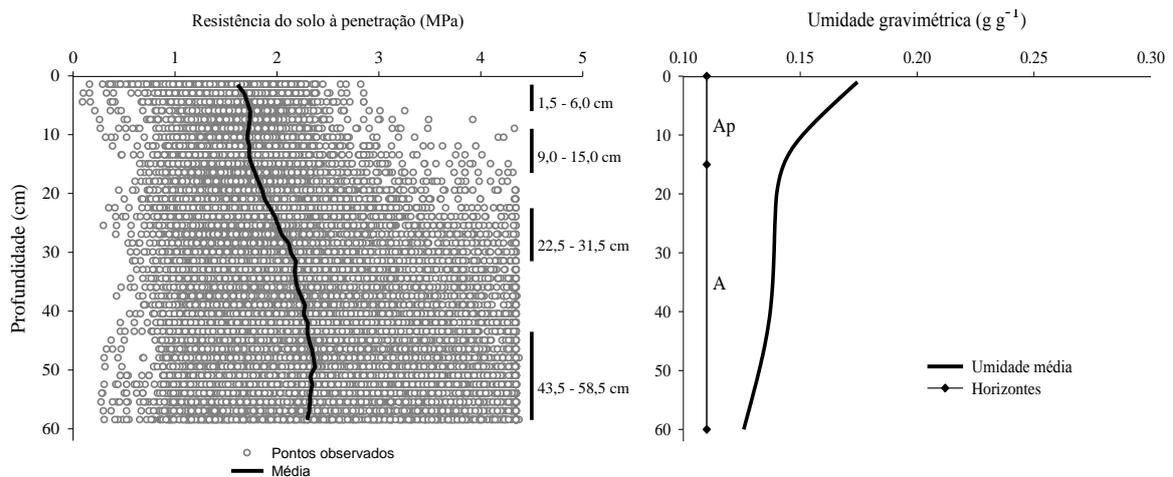


Figura 7 – Resistência do solo à penetração observada no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) em área de implantação, em São Gabriel, RS.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada por meio dos valores de coeficiente de variação (CV) como baixo ($\leq 10\%$), médio (10% - 20%), alto (20% - 30%) e muito alto ($> 30\%$) (GOMES; GARCIA, 2002). Em todas as camadas do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (Tabela 5), o CV da RP variou de 21% a 25% considerado alto pelos autores acima. Entretanto, no Nitossolo Vermelho Distrófico, o CV da RP da maioria das camadas variou de 12% a 19%, sendo considerado de médio. A exceção foi o CV da camada de 7,5-15,0 cm, que é considerado alto (21%). Já no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico o CV da RP variou de médio 19% a muito alto 42%, sendo esta variação atribuída, em parte, a sua estrutura semi-intemperizada, composta por fragmentos grosseiros. Lima et al. (2010) notaram coeficientes de variação médio para resistência à penetração entre 10% e 19%. Em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Abreu (2000) encontrou CV variando de 15 a 44%. Em Latossolo Vermelho Distrófico, o CV variou entre 19% a 35% e, no Latossolo Vermelho Distroférico típico, o CV variou entre 23% a 40% (SILVA, 2003).

Valores de assimetria e curtose próximos de zero, indicam que os dados revelam distribuição de frequência normal. Nesse contexto, verifica-se que todas as camadas do Nitossolo Vermelho Distrófico, Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico e a maioria das camadas do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, exceto a camada de 10,5 – 21,0 cm deste último seguem distribuição normal (CARVALHO et al., 2002).

Tabela 5 – Média, mediana, amplitude, coeficiente de variação (%), assimetria, curtose, mínimo e máximo para a resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas diferentes camadas obtidas por análise fatorial de Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, em áreas de implantação de *Eucalyptus saligna*.

Camadas	Média	Mediana	Amplitude	CV%	Assimetria	Curtose	Mínimo	Máximo
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe								
1,5 – 6,0	1,5	1,5	1,9	21	-0,20	0,35	0,44	2,39
10,5 – 21,0	1,6	1,5	3,0	22	1,50	4,33	0,45	3,44
27,0 – 42,0	1,9	1,8	3,0	27	0,90	0,72	0,74	3,71
46,5 – 58,5	2,7	2,7	3,9	26	0,17	-0,34	0,46	4,35
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd								
1,5 – 4,5	1,8	1,8	2,6	18	0,28	1,59	0,57	3,22
7,5 – 15,0	2,2	2,2	3,3	21	0,41	0,91	0,69	3,98
19,5 – 27,0	2,9	2,9	3,6	19	-0,16	0,57	0,70	4,35
34,5 – 37,5	3,4	3,4	3,4	18	-0,53	0,79	0,92	4,35
51,0 – 58,5	3,9	4,1	3,2	12	-1,82	4,04	1,48	4,71
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico – RReh								
1,5 – 6,0	1,7	1,7	2,6	19	-0,63	2,98	0,12	2,75
9,0 – 15,0	1,7	1,7	3,1	23	0,72	2,78	0,59	3,72
22,5 – 31,5	2,1	2,0	3,6	37	0,62	-0,30	0,64	4,28
43,5 – 58,5	2,3	2,2	3,7	42	0,52	-0,75	0,62	4,35

Para verificar a presença ou não de dependência espacial nos valores de RP, ajustaram-se semivariogramas aos dados de RP. Em todas as camadas do SXe, ajustaram-se semivariogramas tipo Exponencial (Figura 8). Os semivariogramas para todas as camadas não apresentaram estacionaridade. Dessa forma, os valores do alcance da dependência espacial foram elevados. Nas profundidades de 1,5 cm até 58,5 cm, os semivariogramas apresentaram alcance entre 21 a 123 metros (Tabela 6). Para esse tipo de solo e nessa condição de manejo, os modelos apresentaram forte dependência espacial, em torno de 0,80 (Tabela 6), com exceção da camada de 1,5 – 6,0 cm que apresenta moderada dependência espacial, conforme classificação de Cambardella et al. (1994). Nessa classificação são considerados de forte dependência espacial os semivariogramas que tem efeito pepita \leq a 25 % do patamar, moderada quando entre 25 e 75% e de fraca quando $>$ 75%.

Na superfície e até a profundidade de 21 cm, o solo sofre os maiores efeitos do tráfego de máquinas, da atividade biológica e de ciclos de umedecimento e secagem, que provocam maior variabilidade e dispersão dos valores de RP e menores valores de alcance (24 e 21 m).

O coeficiente de determinação (r^2) da relação entre a semivariância e o modelo ajustado foi superior a 0,90, com exceção da camada de 1,5 – 6,0 cm que apresenta moderada dependência espacial e que o r^2 foi de 0,70.

Tabela 6 – Estimativa dos parâmetros dos modelos teóricos ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, em áreas de implantação, em São Gabriel, RS.

Camadas (cm)	Modelo	Co	Co+C	Alcance (m)	R ²	GDE
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe						
1,5 – 6,0	Exponencial	0,037	0,107	24	0,70	0,65
10,5 – 21,0	Exponencial	0,013	0,124	21	0,92	0,89
27,0 – 42,0	Exponencial	0,081	0,349	107	0,99	0,77
46,5 – 58,5	Exponencial	0,170	0,684	123	0,97	0,75
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd						
1,5 – 4,5	Exponencial	0,012	0,103	10	0,85	0,88
7,5 – 15,0	Exponencial	0,031	0,232	16	0,93	0,86
19,5 – 27,0	Esférico	0,141	0,294	19	0,90	0,52
34,5 – 37,5	Esférico	0,166	0,333	35	0,94	0,50
51,0 – 58,5	Linear	0,160	*	*	0,65	0,27
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh						
1,5 – 6,0	Linear	0,084	*	*	0,94	0,20
9,0 – 15,0	Exponencial	0,078	0,195	140	0,99	0,60
22,5 – 31,5	Exponencial	0,057	0,875	117	0,99	0,93
43,5 – 58,5	Exponencial	0,199	1,321	132	0,94	0,85

Co: efeito pepita; Co+C: patamar; R²: coeficiente de determinação; GDE: grau de dependência espacial [C/(Co+C)].

* não existe para esse tipo de semivariograma ajustado.

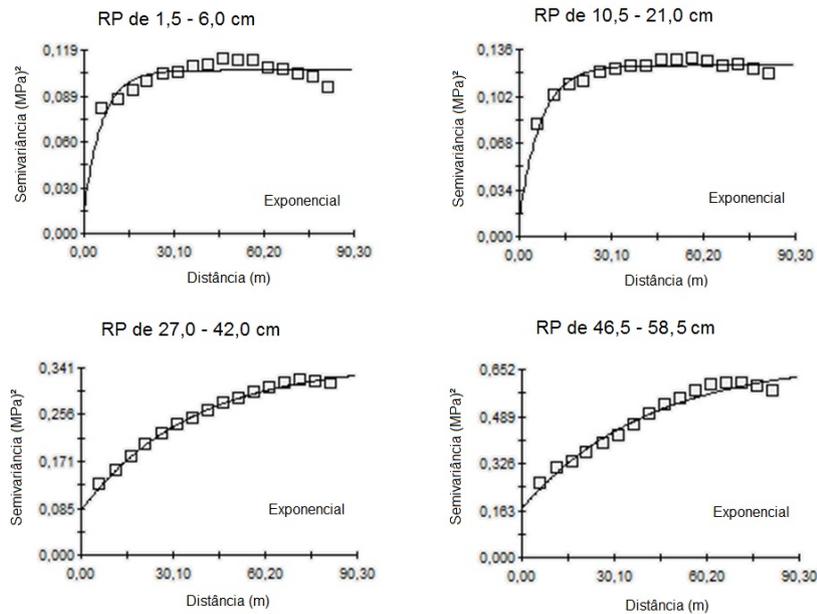


Figura 8 – Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico em área de implantação, em São Gabriel, RS.

No Nitossolo Vermelho Distrófico, ajustaram-se semivariogramas tipo exponencial (camada de 1,5 – 15,0), esférico (camada de 19,0 -37,0) e linear na camada de 51 – 58,5 (Figura 9). Nas camadas de 1,5 – 4,5 cm e 7,5 – 15,0 cm, os semivariogramas apresentaram forte dependência espacial. Nas profundidades de 19,5 a 37,5 cm, ajustaram-se semivariogramas, com moderadas dependências espaciais. No entanto, na camada de 51,0 – 58,5 cm, os dados de RP apresentaram um comportamento crescente com a distância, ajustando-se, então, semivariograma do tipo linear, o qual se caracteriza por não apresentar alcance.

No Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, ajustaram-se semivariogramas tipo exponencial e linear (Figura 10). Na profundidade de 1,5 – 6,0 cm, ajustou-se semivariograma tipo linear. Nas camadas de 9,0 – 15,0 cm; 22,5 – 31,5 cm e 43,5 – 58,5 cm, ajustaram-se semivariogramas do tipo exponencial que apresentaram de moderado a forte dependência espacial.

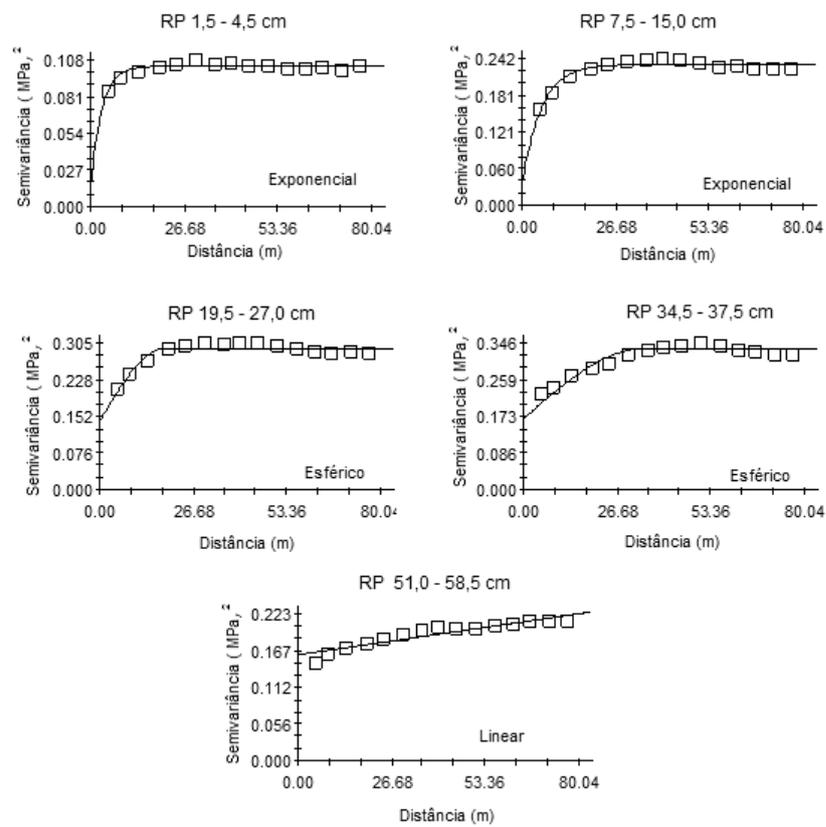


Figura 9 – Semivariogramas ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Nitossolo Vermelho Distrófico típico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS.

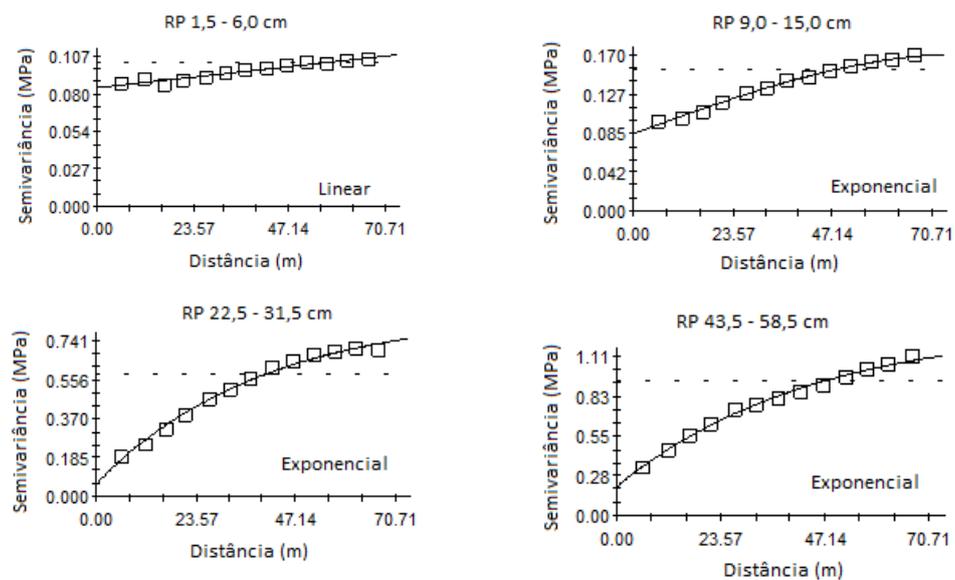


Figura 10 – Semivariogramas ajustados para a resistência à penetração de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Neossolo Regolítico Eutroúmbico típico em área de implantação, em São Gabriel, RS.

Para visualizar a distribuição dos valores de RP nos locais estudados, realizou-se a krigagem dos dados, gerando mapas de isolinhas. Os mapas de isolinhas demonstram que as camadas formadas são contrastantes, o que era o objetivo do emprego da análise fatorial (Figura 11, 12 e 13).

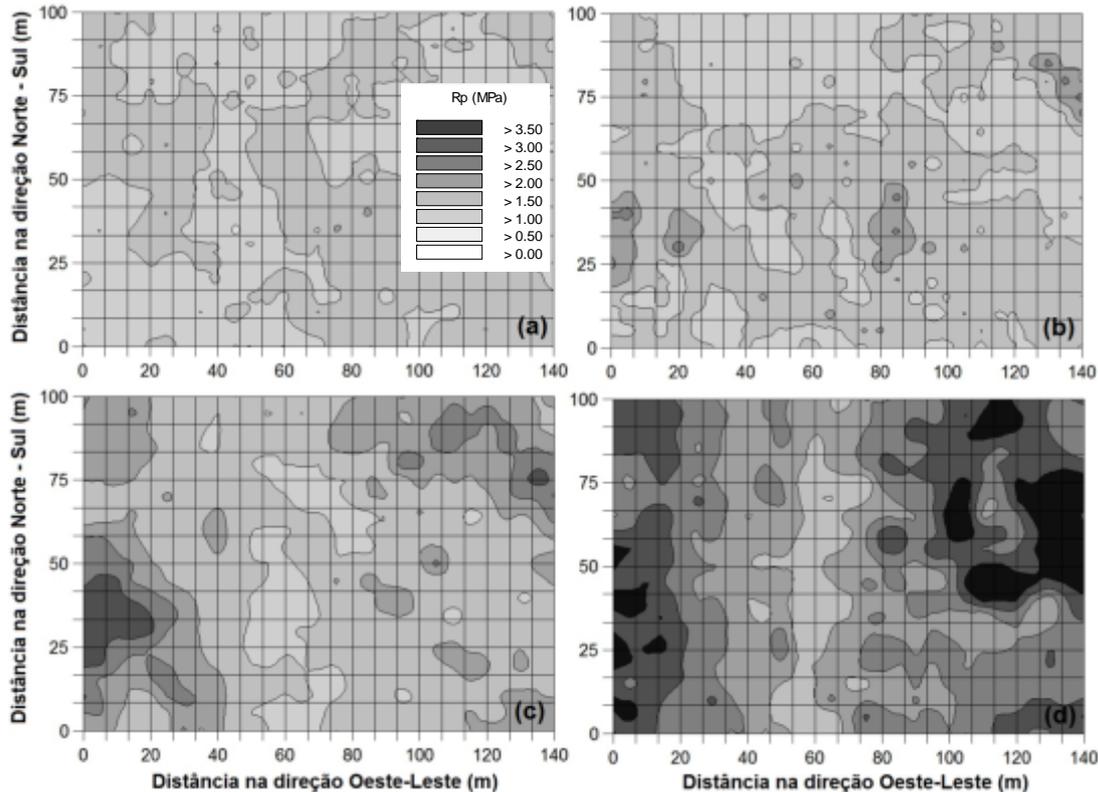


Figura 11 – Mapas de isolinhas da resistência do solo à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico em área de implantação, em São Gabriel, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 6,0 cm; o (b) camada de 10,5 – 21,0 cm; (c) camada de 27,0 – 42,0 cm e o (d) representa a camada de 46,5 – 58,5 cm de profundidade.

Na Figura 11, a camada do gráfico (a) reúne valores de RP com predomínio na faixa 0,5 – 1,5 MPa; o gráfico (b) reúne valores de RP com predomínio nas faixas 0,5 – 1,5 e 2,0 – 2,5 (camada de maior compactação logo abaixo da superfície); o gráfico (c) reúne valores de RP com predomínio no intervalo 1,0 - 2,5; e no gráfico (d) há maior predomínio da faixa de 3,0 – 3,5 MPa (camada de aumento da compactação em profundidade).

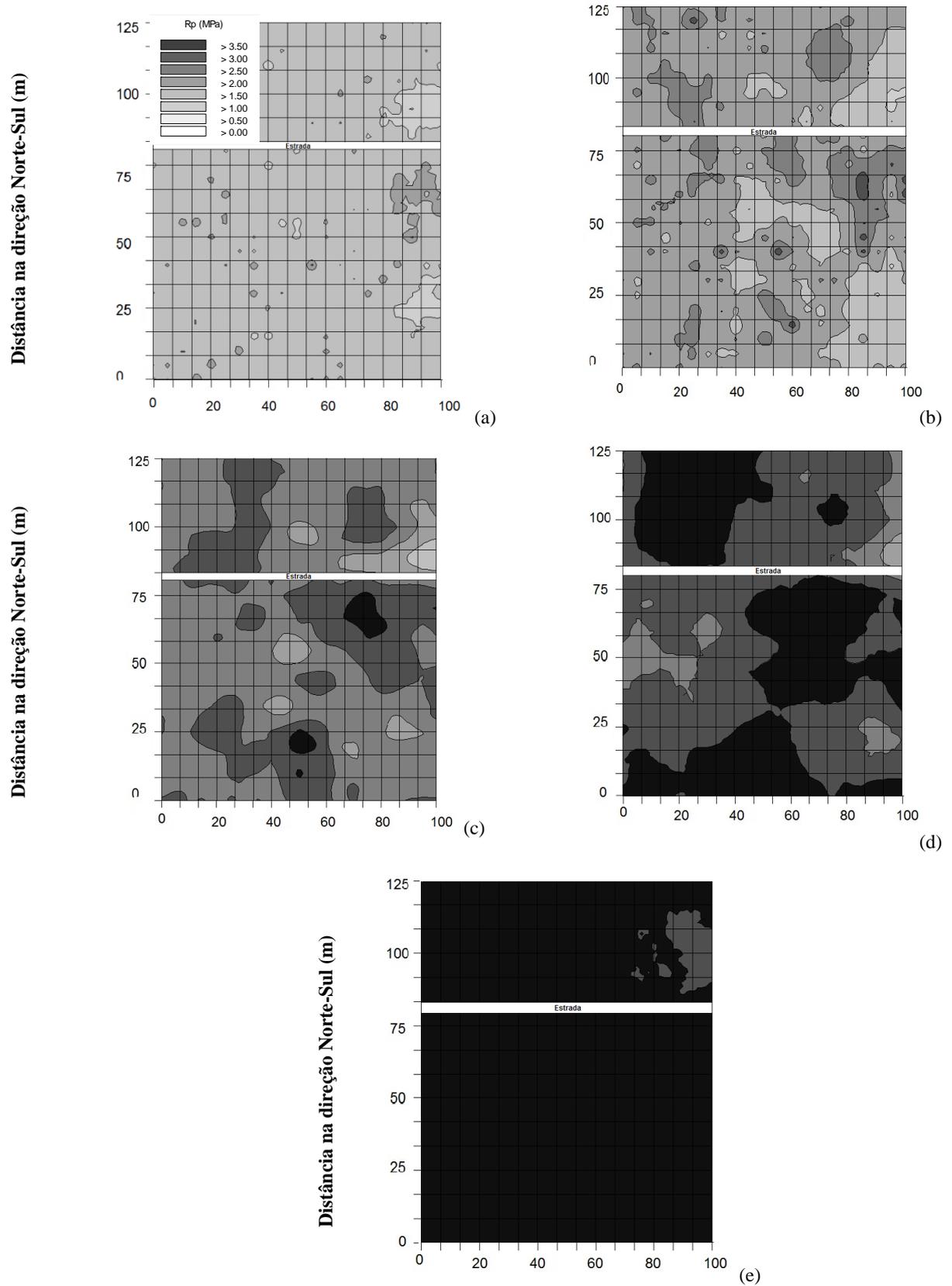


Figura 12 – Mapas de isolinhas da resistência à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Nitossolo Vermelho Distrófico em área de implantação, em Vila Nova do Sul, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 4,5 cm; o (b) camada de 7,5 – 15,0 cm; (c) camada de 19,5 – 27,0 cm; (d) camada de 34,5 – 37,5 cm e o (e) representa a camada de 51,0 – 58,5 cm de profundidade.

Com base nas camadas formadas, verifica-se que uma faixa na extremidade a oeste possibilita estudar o efeito da compactação sobre o crescimento de plantas numa condição de solo mais compactada e com variação da RP em profundidade (Figura 5). As extremidades apresentam maior compactação do que o centro da área amostrada, ou seja, saindo de um estado de maior compactação na cabeceira da área e diminuindo para o centro. Para Silva, (2003) o tráfego de máquinas provoca diferentes estados de compactação do solo e que, o maior estado de compactação depende do local onde o tráfego se concentra.

Na Figura 12, a camada do gráfico (a) reúne RP com predomínio na faixa 1,0 – 1,5 MPa; o gráfico (b) reúne RP nas faixas 1,0 – 1,5 MPa e 2,0 - 2,5 MPa; o gráfico (c) reúne valores de RP com predomínio no intervalo 2,5 – 3,0 MPa; no gráfico (d) há maior predomínio da faixa de 3,0 – 3,5 MPa e o gráfico (e) cuja faixa predominante são valores de RP maiores que 3,5 MPa.

Podemos observar, ainda, no NVd que a distribuição da compactação aumentou com a profundidade em maior intensidade do que no SXe (Figuras 11 e 12).

No RReh, figura 13, a camada do gráfico (a) reúne valores de RP com predomínio na faixa 1,0 – 1,5 MPa; o gráfico (b) reúne valores de RP com predomínio nas faixas 1,0 – 1,5 MPa e 2,0 - 2,5 MPa; o gráfico (c) reúne valores de RP com predomínio no intervalo 2,5 – 3,0 MPa; no gráfico (d) há maior predomínio da faixa de 2,5 – 3,0 MPa a 3,0 – 3,5 MPa.

Portanto, é imprescindível analisar cada situação específica antes de tomar qualquer decisão em relação ao manejo do solo. Em função disso, há necessidade de estudar a compactação em diferentes solos e condições climáticas.

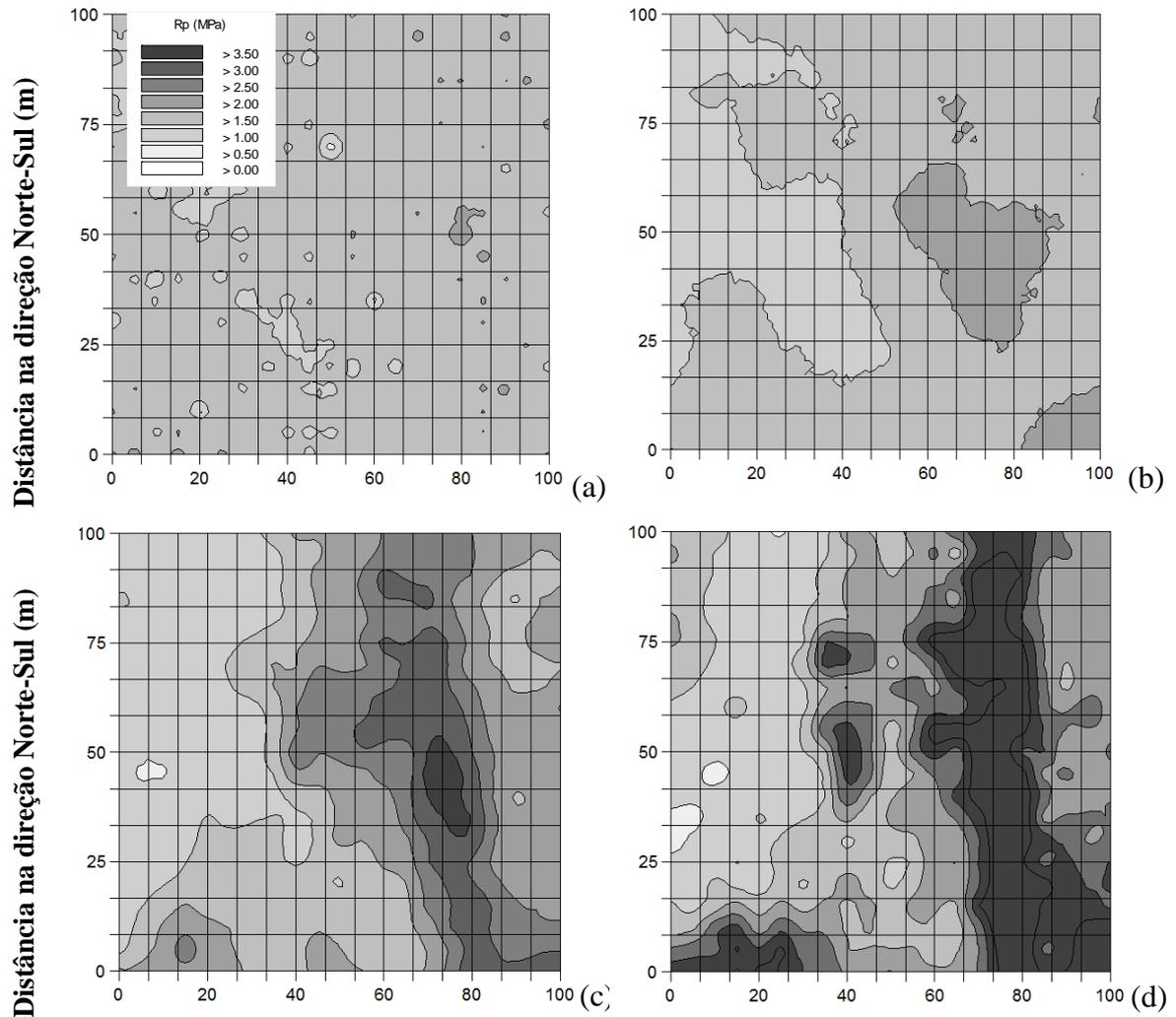


Figura 13 – Mapas de isolinhas da resistência à penetração (MPa) de diferentes camadas obtidas por análise fatorial no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico em área de implantação, em São Gabriel, RS. O gráfico (a) corresponde à camada de 1,5 – 6,0 cm; o (b) camada de 9,0 – 15,0 cm; (c) camada de 22,5 – 31,5 cm; (d) camada de 43,5 – 58,5 cm de profundidade.

Assim, os resultados indicam a grande potencialidade do mapeamento da compactação do solo como ferramenta prática e rápida para a delimitação adequada de camadas compactadas permitindo reconhecer, de forma mais clara, a extensão de atuação dos principais fatores condicionantes da compactação, bem como o impacto do manejo na estrutura do solo.

4.2 Atributos físicos do solo

A composição granulométrica do solo é de grande importância do ponto de vista físico, uma vez que influencia praticamente todas as demais propriedades como a retenção e capacidade de armazenamento de água, distribuição de poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases, a estrutura do solo e nas propriedades de resistência à penetração de raízes. A análise granulométrica do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico indicou valores médios de 182 g kg⁻¹ de argila, 421 g kg⁻¹ de silte e 396 g kg⁻¹ de areia até a profundidade de 60 cm. No Nitossolo Vermelho Distrófico típico a análise granulométrica indicou valores médios de 487 g kg⁻¹ de argila, 239 g kg⁻¹ de silte e 273 g kg⁻¹ de areia. Já no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, a análise granulométrica indicou valores médios de 387 g kg⁻¹ de cascalho, 116 g kg⁻¹ de argila, 165 g kg⁻¹ de silte e 719 g kg⁻¹ de areia. Sampietro (2013), estudando algumas propriedades físicas do solo em áreas de implantação de plantios de *Eucalyptus* sp. na região de São Gabriel, RS, verificou no Planossolo Háplico Eutrófico (SXE), em média, até 60 cm profundidade, 28 g kg⁻¹ de cascalho, 176 g kg⁻¹ de argila, 516 g kg⁻¹ de areia e 307 g kg⁻¹ de silte, no Planossolo Háplico Distrófico gleissólico 48 g kg⁻¹ de cascalho, 227 g kg⁻¹ de argila, 353 g kg⁻¹ de areia e 420 g kg⁻¹ de silte, sendo observado também um acréscimo de argila e um decréscimo de areia em profundidade. Contudo, estes resultados mostram que o NVd contém 30% mais argila que o SXe e que o RReh apresenta 44% mais areia que o NVd e 32% mais que o SXe (Figura 14).

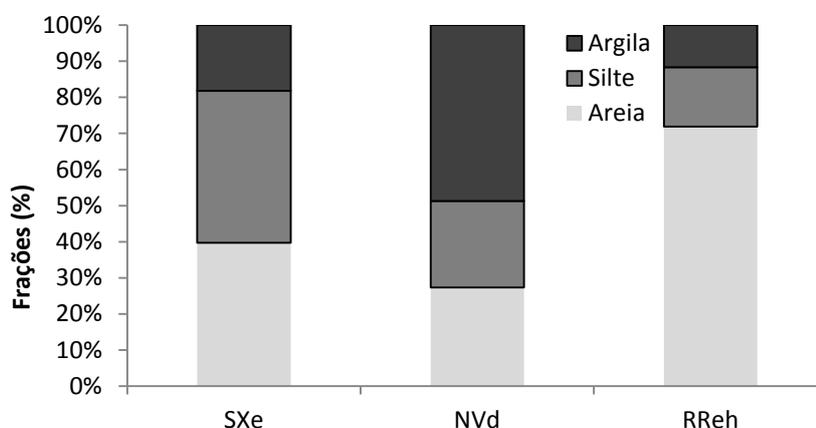


Figura 14 – Análise granulométrica do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXE), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

No entanto, quando observamos o gradiente textural em profundidade, verifica-se que este é mais elevado no SXe (Anexo 1), e mais baixo no NVd (Anexo 2) e RReh (Anexo 3), fato que corrobora com Costa et al. (2009), em seu levantamento detalhado da microbacia hidrográfica de um horto florestal no estado do Rio Grande do Sul.

4.2.1 Parâmetros físico-hídricos do solo em diferentes estados de compactação do solo.

A densidade do solo variou de 1,42 a 1,55 g cm⁻³ no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, de 1,34 a 1,43 g cm⁻³ no Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico variou de 1,34 g cm⁻³ a 1,53 g cm⁻³ (Tabela 7), relacionando-se com sua estrutura e textura do solo.

No Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, a densidade do solo na camada de 0 a 10 cm foi semelhante no EC1 e EC2 e menor no EC3; contudo essas diferenças não foram significativas (Tabela 7). Nas camadas de 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm, a densidade aumentou com o aumento da compactação; no entanto, somente na camada de 20 a 40 cm esse aumento foi significativo.

A densidade do solo no Nitossolo Vermelho Distrófico típico aumentou com o aumento da compactação em todas as camadas, mas esse aumento não foi significativo. Já no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, a densidade do solo na maioria das camadas, exceto na camada 0-10 cm, aumentou com o aumento da compactação (Tabela 7).

A densidade do solo variou com a textura do solo. Assim, as maiores densidades foram encontradas no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (182g kg⁻¹ de argila). No entanto, essas densidades não atingiram os valores críticos, os quais conforme Camargo (1997), para solos de textura franco-argilosa a argilosa estão em torno de 1,50 g cm⁻³ e para solos arenosos a franco arenosos por volta de 1,85 g cm⁻³.

Para espécies florestais de rápido crescimento, Gent et al. (1984), consideram que valores de 1,58 g cm⁻³ em solos de textura argilosa na camada de 0 a 15 cm são limitantes, sendo que, para a camada de 10 a 25 cm quando os valores se aproximam de 1,80 g cm⁻³ o crescimento de raízes cessa. Entretanto, Reichert et al. (2003), estudando culturas de ciclo curto, propuseram como limites de densidade 1,45 g cm⁻³ para solos com textura argilosa (> 550 g kg⁻¹ de argila), 1,55 g cm⁻³ para textura média (200 a 550 g kg⁻¹ de argila) e 1,65 g cm⁻³ para textura arenosa (< 200 g kg⁻¹ de argila).

Tabela 7 – Densidade do solo em diferentes estados de compactação em um Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.

Camada (cm)	Estado de compactação			CV(%)
	EC1	EC2	EC3	
Densidade do Solo (g cm^{-3})				
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe				
0-10	1,49 a	1,49 a	1,46 a	5
10-20	1,46 a	1,49 a	1,51 a	4
20-40	1,42 b	1,44 b	1,55 a	4
40-60	1,48 a	1,53 a	1,54 a	5
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd				
0-10	1,34 a	1,36 a	1,38 a	6
10-20	1,34 a	1,37 a	1,38 a	4
20-40	1,34 a	1,37 a	1,37 a	3
40-60	1,42 a	1,40 a	1,43 a	2
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh				
0-10	1,45 a	1,42 a	1,43 a	4
10-20	1,38 b	1,45 a	1,47 a	3
20-40	1,34 b	1,45 a	1,49 a	4
40-60	1,38 b	1,49 a	1,53 a	2

Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

A porosidade total nos diferentes solos variou de 0,40 a 0,49 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 8). De acordo com Prevedello (1996), a porosidade total, está dentro da faixa adequada, embora esta possa ter variações em função da textura, teor de matéria orgânica e compactação do solo. Segundo o mesmo autor, embora exista uma grande variação em relação à porosidade total dos solos, em solos arenosos, varia entre 0,35 a 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, enquanto para solos argilosos, varia entre 0,40 a 0,65 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Neste contexto, observa-se que o solo mais argiloso (NVd) apresenta uma porosidade total maior que os solos mais arenosos. Isto se deve ao fato do material argiloso ser mais fino que as areias, e dispor de uma maior quantidade de poros pequenos, em comparação às areias que são partículas maiores e portanto, deixam espaços de tamanho maior, mas menos numerosos.

No SXe as diferenças de porosidade total não foram significativas em nenhuma camada. No entanto, no NVd (camada 0-10 e 40-60 cm) e no RReh (camada 20-40 cm) a porosidade total diminuiu com a compactação do solo. Stone et al. (2002) verificaram que a compactação do solo aumentou sua resistência à penetração e reduziu a porosidade total e a macroporosidade.

O volume de macroporos, em todas as camadas avaliadas, do SXe e no NVd, são baixos em relação à quantidade de microporos, pois um solo ideal deveria ter 1/3 de macroporos e 2/3 de microporos, além disso, deve ter volume de poros de aeração superior a 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (TAYLOR; ASCROFT, 1972; HILLEL, 1998; REICHERT et al., 2007).

Tabela 8 – Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo nos diferentes estados de compactação.

Camada (cm)	Estado de compactação			
	EC1	EC2	EC3	CV(%)
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,44 a	0,43 a	0,42 a	6
10-20	0,45 a	0,44 a	0,43 a	6
20-40	0,49 a	0,48 a	0,46 a	10
40-60	0,47 a	0,43 a	0,45 a	11
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,07 a	0,08 a	0,09 a	24
10-20	0,10 a	0,11 a	0,10 a	25
20-40	0,13 a	0,12 a	0,10 a	35
40-60	0,13 a	0,11 a	0,06 b	16
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,37 a	0,35 ab	0,33 b	7
10-20	0,35 a	0,33 a	0,32 a	9
20-40	0,36 a	0,36 a	0,36 a	11
40-60	0,34 b	0,34 b	0,38 a	7
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,49 a	0,48 ab	0,46 b	4
10-20	0,48 a	0,47 a	0,47 a	4
20-40	0,47 a	0,48 a	0,47 a	5
40-60	0,46 b	0,48 a	0,47 ab	3
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,08 a	0,08 a	0,09 a	21
10-20	0,06 a	0,07 a	0,07 a	29
20-40	0,07 a	0,06 a	0,07 a	34
40-60	0,06 a	0,05 a	0,06 a	29
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,40 a	0,40 a	0,38 b	7
10-20	0,41 a	0,40 a	0,39 a	4
20-40	0,41 ab	0,42 a	0,40 b	2
40-60	0,39 b	0,43 a	0,41 ab	5
Neossolo Regolítico Eutroúmbico típico - RReh				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,44 a	0,45 a	0,44 a	7
10-20	0,43 a	0,44 a	0,44 a	4
20-40	0,45 a	0,44 ab	0,42 b	2
40-60	0,46 a	0,42 a	0,40 a	5
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,21 a	0,19 a	0,19 a	30
10-20	0,21 a	0,21 a	0,22 a	14
20-40	0,25 a	0,22 ab	0,24 ab	9
40-60	0,27 a	0,22 a	0,23 a	20
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,24 a	0,26 a	0,25 a	22
10-20	0,22 a	0,23 a	0,21 a	12
20-40	0,21 a	0,22 a	0,18 b	9
40-60	0,19 a	0,20 a	0,17 b	7

Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

No Nitossolo Vermelho Distrófico típico, a proporção dos macroporos ao longo do perfil, é menor do que no Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (Figura 15). Isto indica que este solo é menos drenado e arejado que o SXe e com maior capacidade de retenção de água. Este fato pode ser atribuído a variação textural entre os solos, que contribui para diferenças na macroporosidade. Assim o solo com maior quantidade de argila apresenta maior capacidade de retenção de água, uma vez que, a água é retida em pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo. Quanto menor a partícula, maior a área superficial e maior a capacidade de retenção de água.

Já o Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico apresenta uma alta macroporosidade, em níveis adequados para uma boa aeração e trocas gasosas do solo (Tabela 8). No entanto, os volumes de microporos é inferior ao considerado ideal em todas as camadas. Com isso verifica-se que embora este solo tenha uma boa aeração e uma boa capacidade de infiltração de água no solo, ele tem uma menor capacidade de retenção desta água.

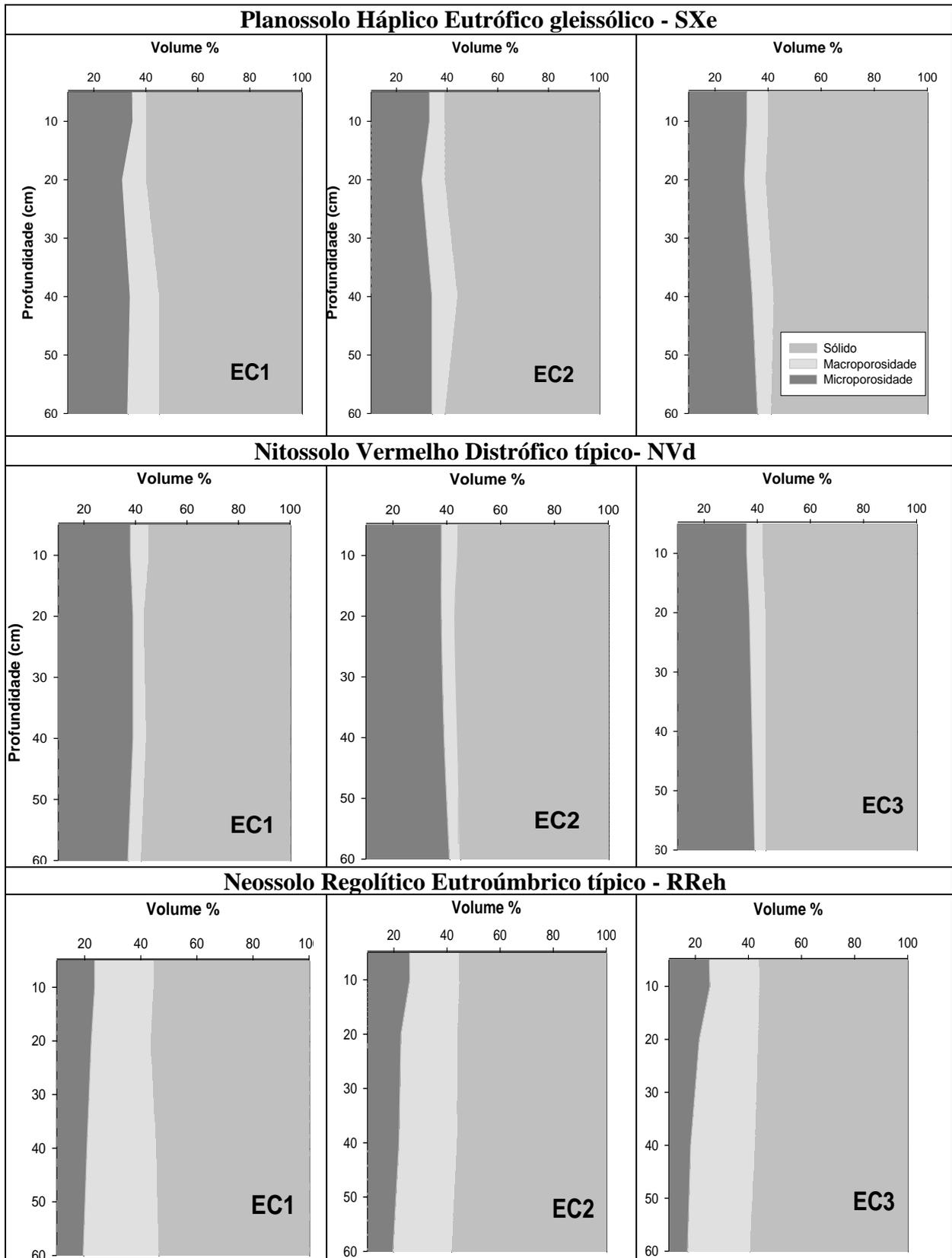


Figura 15 – Volume da distribuição dos poros no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3).

A curva de retenção de água no solo expressa a relação entre o conteúdo de água e o potencial matricial da água no solo. A retenção da água no solo é afetada por uma série de fatores, mas principalmente pela distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo.

A retenção de água na camada superficial do solo (0 a 10 cm), no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (Figura 16), em condições saturadas, foi maior no menor estado de compactação (EC1).

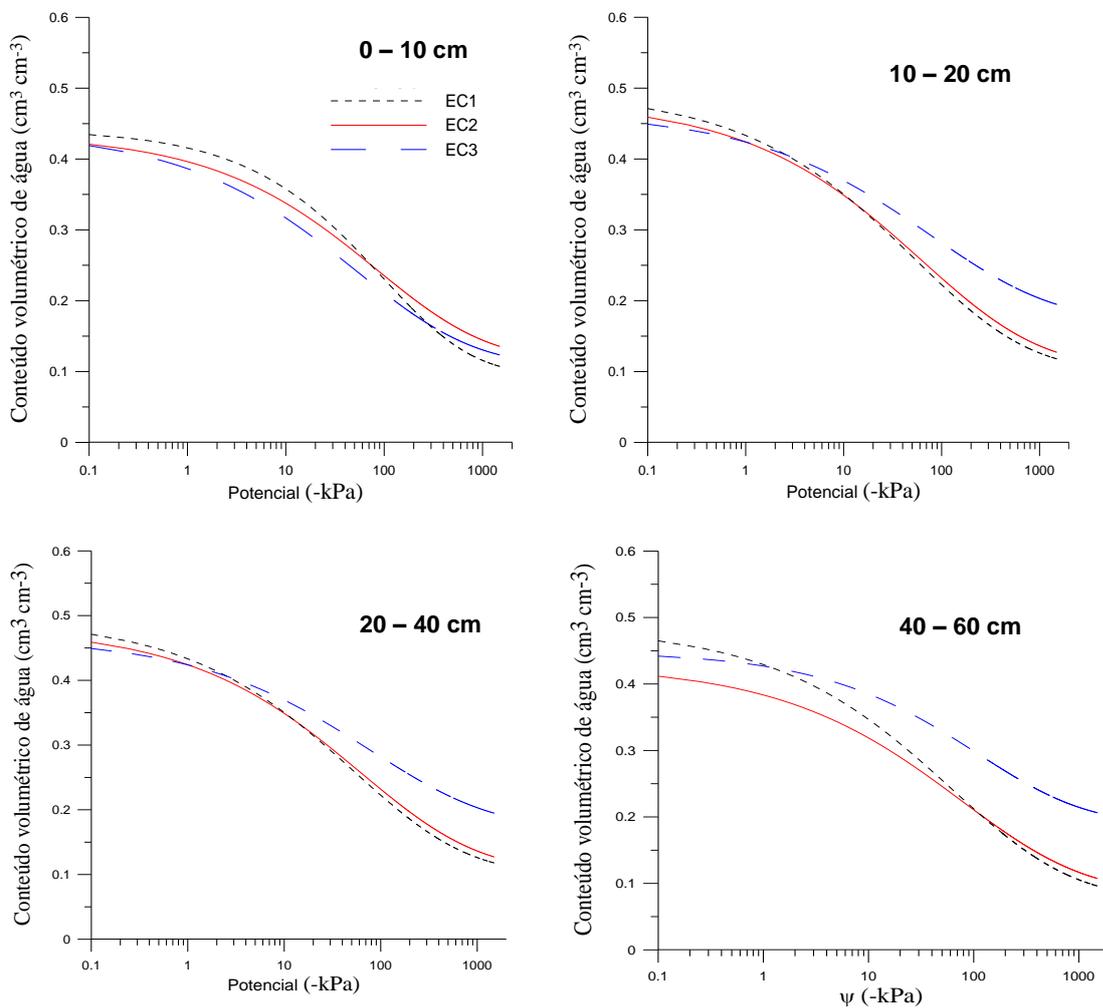


Figura 16 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico.

A partir do potencial de -100 kPa ocorreu um aumento na retenção de água no estado de compactação intermediário (EC2), em relação ao EC1. Isso indica que ocorreu uma

alteração na distribuição dos poros, principalmente na sua continuidade, pois a quantidade de poros nessa camada foi semelhante entre os estados de compactação.

Na camada de 10 a 20 cm, a retenção de água foi maior no EC1 até o potencial de -2 kPa e, nos potenciais menores, a retenção foi maior no EC3.

Na camada de 20 a 40 cm, em condições saturadas, a retenção de água foi semelhante nos três estados de compactação. No entanto, a partir do potencial de -1 kPa a retenção foi maior no maior estado de compactação (EC3).

Na camada de 40 a 60 cm, em condições saturadas, a retenção de água foi maior no EC1. No entanto, a menor retenção de água no EC2, em condições de saturação deve-se à menor porosidade total em relação aos demais estados de compactação. A partir do potencial de -1 kPa, a retenção foi maior no EC3 devido à maior microporosidade desse estado de compactação nessa camada.

Assim, os comportamentos das curvas de retenção de água desse solo indicam haver alterações pela compactação do solo nessas camadas. Assim, as baixas tensões, os maiores estados de compactação retêm menos água do que o estado menos compactado, no entanto, essa relação se modifica a altas tensões.

No Nitossolo Vermelho Distrófico típico (Figura 17) a retenção de água na camada superficial do solo (0 a 10 cm), em condições saturadas, foi maior no EC1 e semelhante para os estados de compactação EC2 e EC3. A partir do potencial de -10 kPa ocorreu um aumento na retenção de água nos estados de compactação EC2 e EC3 em relação ao EC1.

Na camada de 10 a 20 cm, a retenção de água nos maiores potenciais foi maior no menor estado de compactação (EC1). A partir de -10 kPa essa relação se inverte. Já na camada de 20 a 40 cm, em condições saturadas, a retenção de água foi maior no EC3.

Na camada de 40 a 60 cm, o comportamento da curva foi semelhante para os três estados de compactação, mas o estado de compactação com maior retenção de água foi o EC2 (estado de compactação intermediário).

Os comportamentos das curvas de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, variaram com a profundidade. Nas camadas superficiais (0-20 cm) nos maiores potenciais (até -10 kPa), o EC1 foi o estado de compactação que apresentou a maior retenção de água. Entretanto, com o aumento da profundidade, os estados mais compactados (EC2 e EC3) apresentaram maior retenção de água.

Quando comparadas as curvas de retenção de água no solo (Figura 16 e 17), o Nitossolo Vermelho Distrófico típico apresentou maior retenção de água do que o Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, possivelmente devido à sua textura mais argilosa. Essa

característica do solo indica que esse solo possui baixa permeabilidade, no entanto, apresenta alta retenção de água, pois apresenta maior força de coesão entre as partículas, o que, além de dificultar à penetração de água, favorece a retenção, já que consegue reter mais água devido à maior presença de microporos.

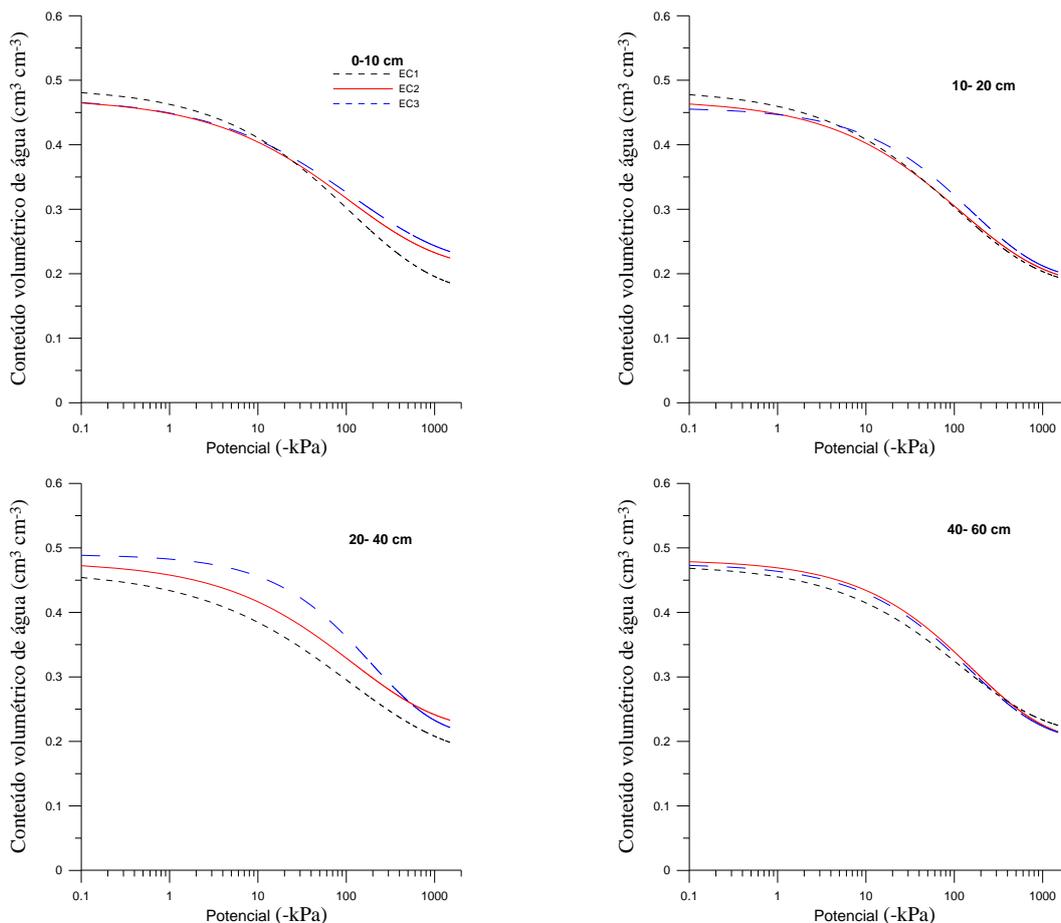


Figura 17 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Nitossolo Vermelho Distrófico típico.

No Neossolo Regolítico Eutroúmbrio típico (Figura 18), as curvas de retenção de água decrescem rapidamente com o aumento do potencial matricial. Este fato é uma característica deste solo arenoso que possui uma maior quantidade de macroporos.

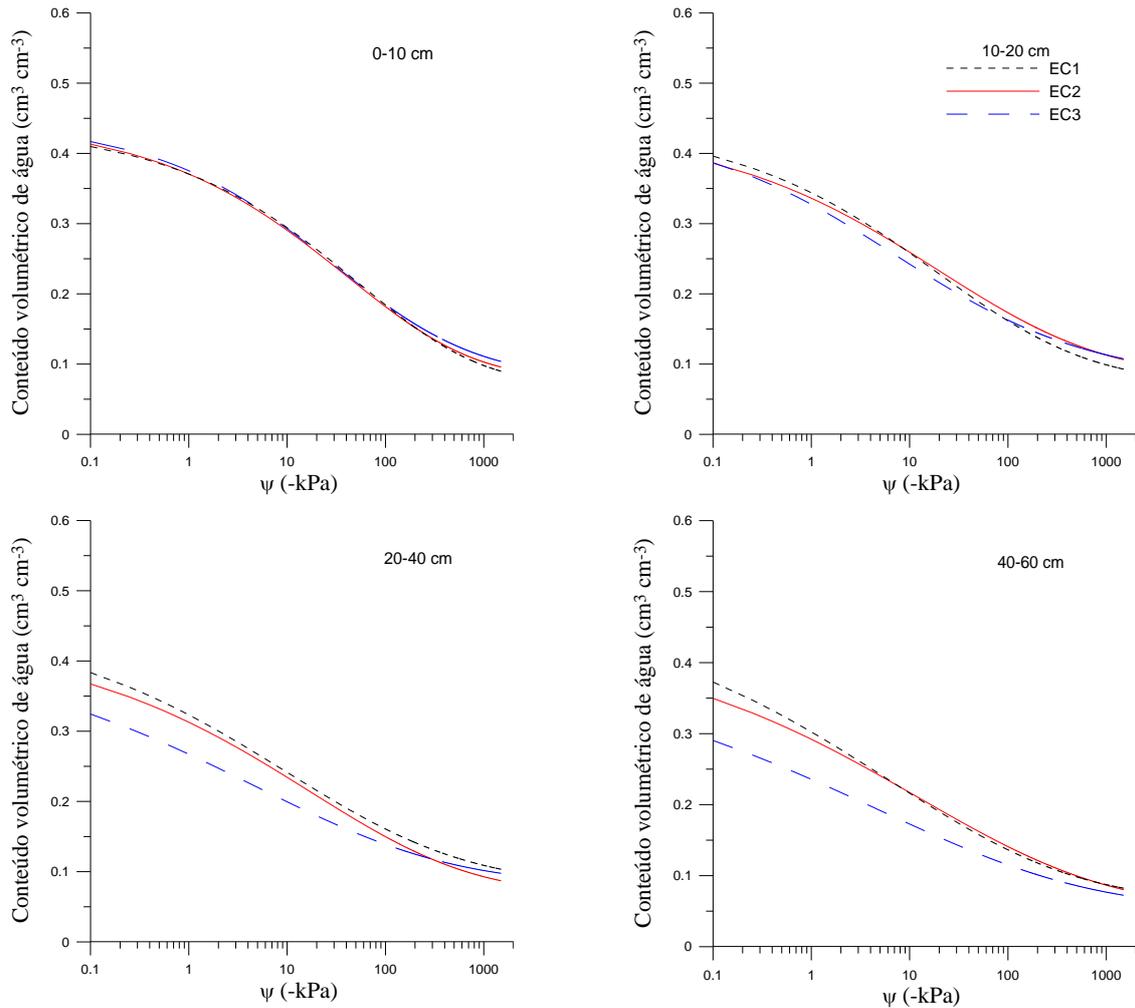


Figura 18 – Curva de retenção de água, nos diferentes estados de compactação, no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.

Pode-se verificar também que a retenção de água na camada superficial do solo (0 a 10 cm), em condições saturadas foi inferior aos demais tipos de solo. Em todos os estados de compactação a curva apresentou o mesmo comportamento nesta camada.

As diferenças mais pronunciadas podem ser observadas nas camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm onde o EC3 apresentou menor retenção de água, em relação ao EC1 e EC2, na faixa de -0,1 a -100 kPa.

O conteúdo de água na capacidade de campo ($CC = -100$ kPa), obtido na curva de retenção de água (Figura 16), foi significativamente menor no maior estado de compactação na camada superficial (0 a 10 cm) no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (Tabela 9), indicando menor quantidade de microporos nessa camada, em relação aos demais estados de compactação. Nas demais camadas, a compactação do solo não proporcionou variações significativas no conteúdo de água na capacidade de campo. O conteúdo de água no ponto de

murcha permanente (PMP= -1500 kPa) variou de 0,10 a 0,19 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ entre as camadas e os estados de compactação. Na camada de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm o estado de maior compactação apresentou significativamente as maiores umidades no ponto de murcha permanente.

No Nitossolo Vermelho Distrófico típico, o conteúdo de água na capacidade de campo variou de 0,37 a 0,41 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Nas camadas de 0 a 10 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm, os conteúdos de água na capacidade de campo foram significativamente menor no maior estado de compactação (Tabela 9). Na camada de 10 a 20 cm, as variações no conteúdo de água na capacidade de campo não foram significativas.

O conteúdo de água no ponto de murcha permanente variou de 0,18 a 0,23 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ entre as camadas e estados de compactação. Na camada de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm o estado de maior compactação apresentou significativamente as maiores umidades no ponto de murcha permanente. Entretanto, as camadas de 10 a 20 cm e 40 a 60 cm não apresentaram diferenças significativas.

A quantidade de água disponível para as plantas foi significativamente menor na camada de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm no maior estado de compactação. Entretanto, as camadas de 10 a 20 cm e 40 a 60 cm não apresentaram diferenças significativas.

O Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico apresentou, em geral, os menores valores de CC e PMP (Tabela 9). A quantidade de água disponível para as plantas foi significativamente menor na camada de 20 a 40 cm no maior estado de compactação.

Entretanto, nas demais camadas, não apresentaram diferenças significativas. Conforme, Azevedo et al. (2007), a composição do solo pode influir na taxa de infiltração e na capacidade de retenção da água. Em solos arenosos, ocorre infiltração mais rápida e há pouca retenção da água devido ao espaço poroso (predomínio de macroporos), que permite a drenagem livre da água do solo.

Este solo reteve pouca água e quando comparado ao Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e o Nitossolo Vermelho Distrófico típico podemos observar que apresenta ligeiramente menor volume de água disponível (Figura 19).

Tabela 9 – Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) obtida através da curva de retenção de água no solo.

Camada (cm)	Estado de compactação			
	EC1	EC2	EC3	CV(%)
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe				
Umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,35 a	0,33 ab	0,31 b	6,1
10-20	0,32 a	0,31 a	0,32 a	10,9
20-40	0,35 a	0,35 a	0,36 a	11,3
40-60	0,35 a	0,31 a	0,38 a	16,4
Umidade no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,10 b	0,12 a	0,12 a	6,4
10-20	0,11 c	0,14 a	0,13 b	3,7
20-40	0,10 b	0,11 b	0,17 a	4,4
40-60	0,11 c	0,13 b	0,19 a	5,0
Capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,25 a	0,21 b	0,19 b	11,0
10-20	0,22 a	0,18 a	0,19 a	19,3
20-40	0,25 a	0,24 ab	0,19 b	19,0
40-60	0,23 a	0,21 ab	0,19 b	12,2
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd				
Umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,39 a	0,39 a	0,37 b	4,4
10-20	0,40 a	0,39 a	0,38 a	4,3
20-40	0,40 ab	0,41 a	0,39 b	2,6
40-60	0,39 b	0,43 a	0,41 b	3,3
Umidade no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,18 b	0,19 a	0,19 ab	5,8
10-20	0,22 a	0,22 a	0,20 a	4,2
20-40	0,23 a	0,21 b	0,23 a	3,2
40-60	0,21 a	0,23 a	0,22 a	1,8
Capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,21 a	0,20 ab	0,18 b	11,3
10-20	0,18 a	0,17 a	0,19 a	10,0
20-40	0,17 b	0,19 a	0,16 c	5,2
40-60	0,18 a	0,20 a	0,18 a	8,0
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RRh				
Umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,28 a	0,29 a	0,28 a	8,1
10-20	0,25 a	0,24 a	0,24 a	11,1
20-40	0,23 a	0,24 a	0,20 b	7,8
40-60	0,22 a	0,22 a	0,19 b	9,1
Umidade no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,07 b	0,08 a	0,08 a	4,3
10-20	0,07 b	0,08 a	0,08 ab	5,1
20-40	0,08 a	0,07 b	0,08 a	3,5
40-60	0,07 a	0,05 b	0,06 b	4,7
Capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)				
0-10	0,21 a	0,21 a	0,20 a	11,9
10-20	0,17 a	0,16 a	0,16 a	16,0
20-40	0,15 a	0,17 a	0,12 b	12,1
40-60	0,16 a	0,16 a	0,14 a	14,0

Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

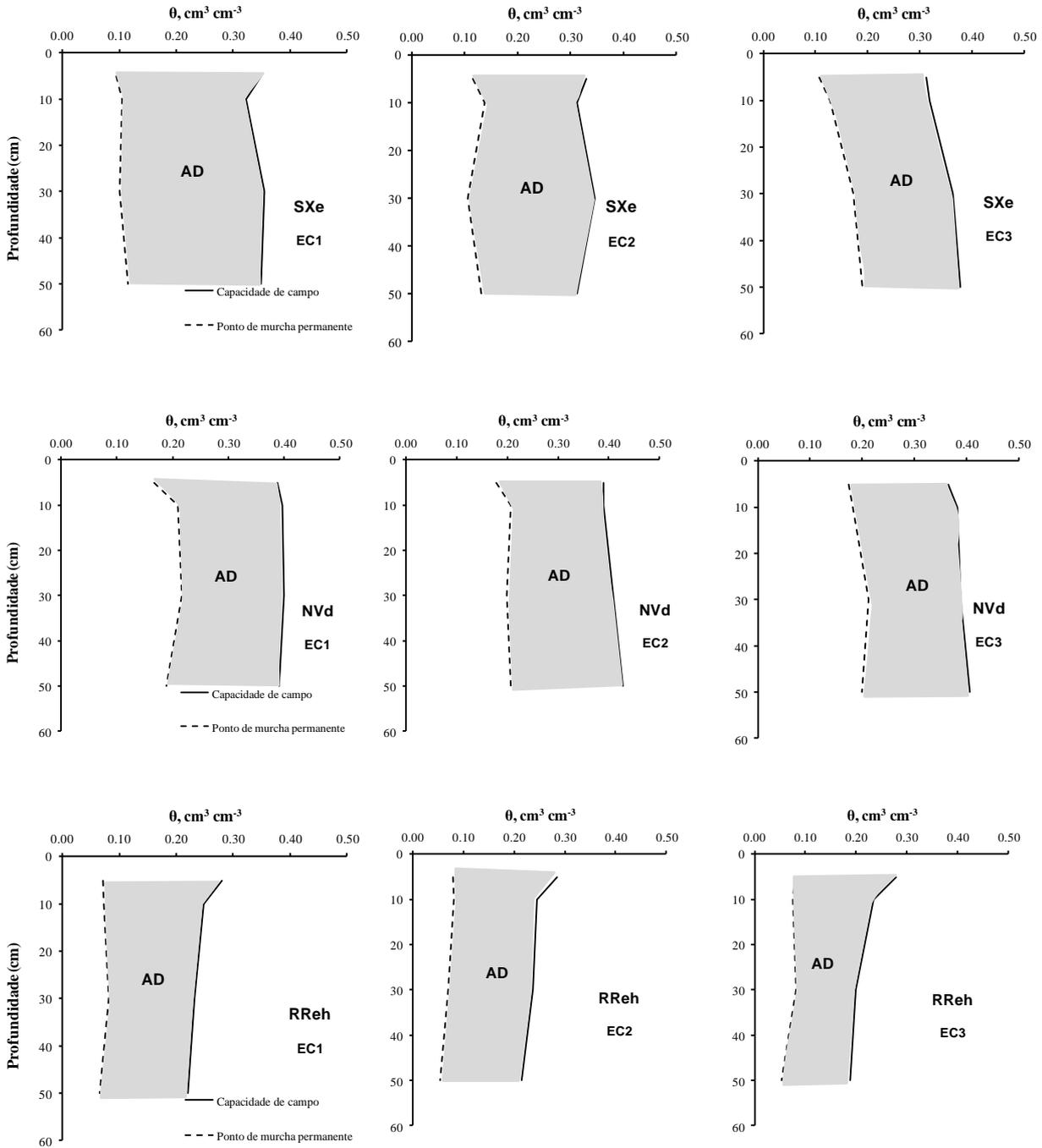


Figura 19 – Variação da água disponível (AD) no perfil do solo, nos diferentes estados de compactação no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh). Limite superior: umidade do solo na capacidade de campo; Limite inferior: umidade do solo no ponto de murcha permanente.

4.3 Indicadores de qualidade física do solo

4.3.1 Intervalo hídrico ótimo

Utilizou-se o método descrito por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998) para quantificar a faixa limitante de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas (IHO). Assim, foram utilizados modelos e procedimentos estatísticos para ajustar a CRA e a CRS. A partir desses modelos foram definidos os conteúdos de água θ_{CC} , θ_{PA} , θ_{PMP} e θ_{RP} e procedeu-se a determinação do IHO para as quatro camadas dos solos avaliados (Figura 20, 21 e 22).

O valor da resistência à penetração de referência, adotado neste estudo, é de 3 MPa, uma vez que, segundo Sampietro (2013), para espécies florestais é recomendável o uso de RP crítica de 3 MPa para cálculo do IHO e obtenção da densidade crítica.

No Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXE) (Figura 20) o IHO foi reduzido com o aumento da densidade do solo. Fato também observado por Silva (2003), em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, com diferentes estados de compactação, cultivado sob plantio direto.

A umidade do solo correspondente a 3 MPa de RP aumentou progressivamente com o aumento da densidade do solo, indicando que a RP foi a responsável pelo limite inferior do IHO para densidades do solo acima de 1,26 Mg m⁻³ na camada de 0-10 cm; acima de 1,35 Mg m⁻³ para camada de 10-20 cm e acima de 1,32 Mg m⁻³ para as camadas de 20-40 e 40-60 cm de profundidade.

O contrário foi observado na porosidade de aeração ($\theta_{PA10\%}$), em que ocorreu redução progressiva com o aumento da densidade do solo, como foi também observado por Collares et al. (2006), em um Argissolo, sob diferentes estados de compactação e por Sampietro (2013), em um Planossolo Háptico Eutrófico e em um Planossolo Háptico Distrófico gleissólico destinado ao plantio de *Eucalyptus* sp.

O limite superior do IHO foi a capacidade de campo até as densidades de 1,49 Mg m⁻³, 1,42 Mg m⁻³, 1,52 Mg m⁻³ e 1,51 Mg m⁻³, nas camadas 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente, sendo, a partir desse ponto, a porosidade de aeração o responsável pelo limite superior do IHO.

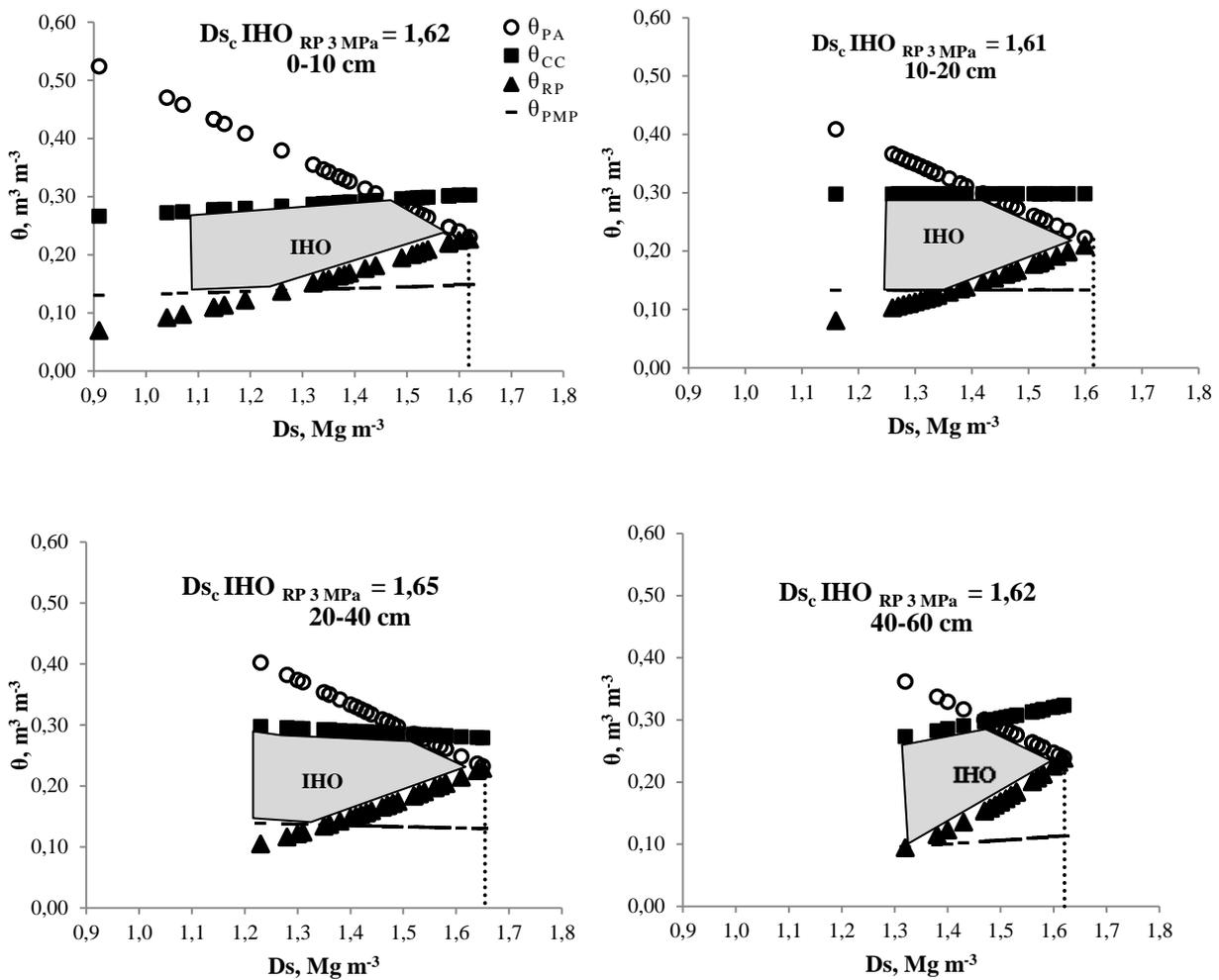


Figura 20 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c \text{ IHO}_{RP 3 \text{ MPa}}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.

No Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) (Figura 21) os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} aumentaram com o aumento do valor de densidade do solo. Isto pode ser atribuído a redistribuição do tamanho de poros que, em virtude do aumento da densidade, proporciona uma redução da macroporosidade e aumento da microporosidade. Esta alteração na porosidade do solo exerce grande influência na retenção de água no solo para condições de potenciais mais elevados, que geralmente são altamente dependentes da estrutura do solo. No entanto, em condições de potenciais mais baixos a retenção de água do solo está associada à textura. Assim, à água retida nos microporos e em películas muito finas ao redor dos colóides do solo são influenciadas pela textura. Com isso, o aumento do conteúdo de água retido no

PMP, em função do incremento da densidade, está associado ao aumento do número de partículas disponíveis para a retenção de água, e o aumento do conteúdo de água na CC está associado ao aumento da microporosidade do solo. No entanto, 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).

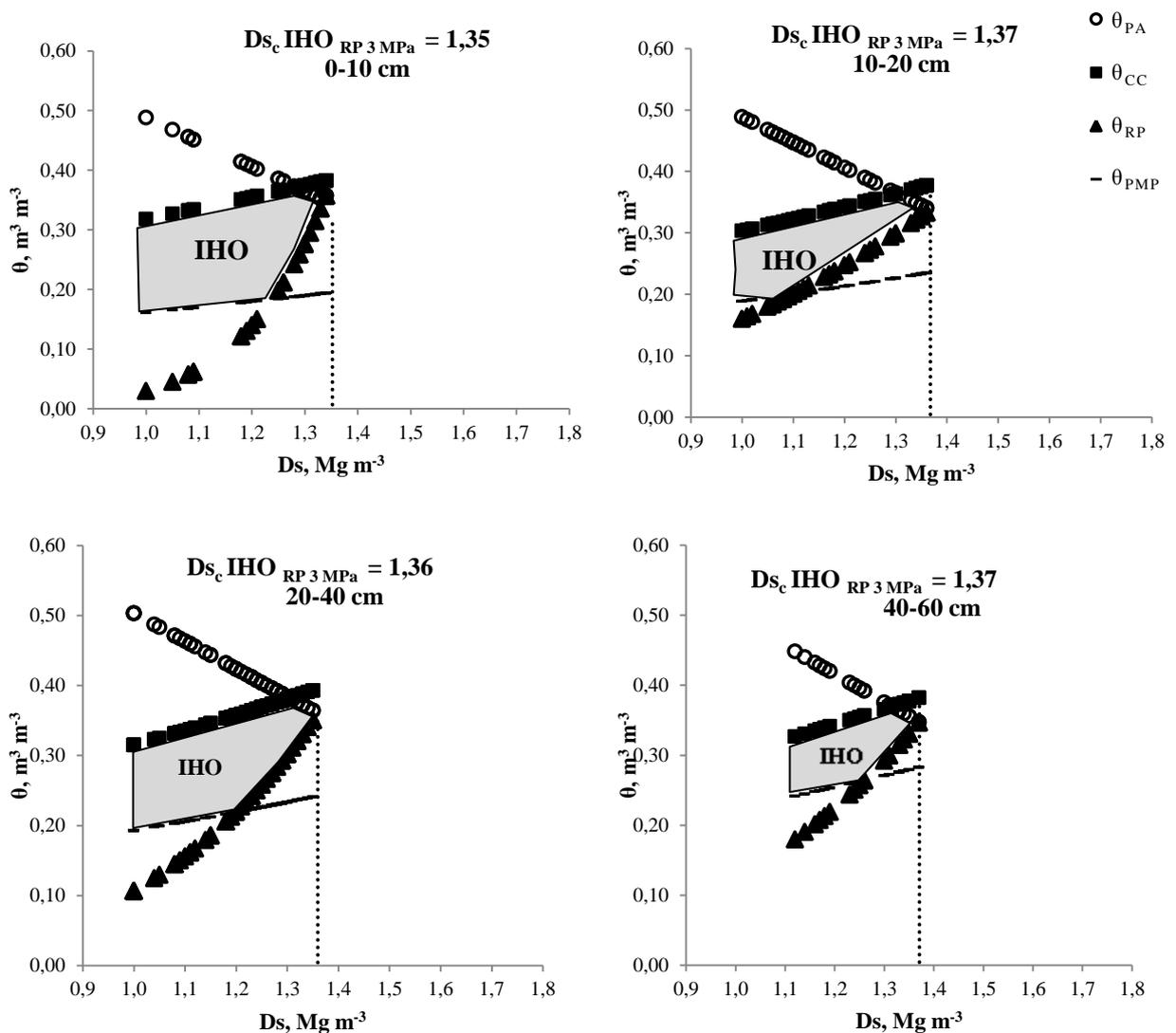


Figura 21 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVD); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.

O limite superior do IHO foi a capacidade de campo até as densidades de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$, $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, nas camadas 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente, sendo, a partir desse ponto, a porosidade de aeração a responsável pelo limite superior do IHO. No entanto, pode-se observar que a porosidade de aeração ($\theta_{PA10\%}$), decresceu com o aumento da densidade do solo, como foi observado no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (Figura 20). Tal comportamento indica que houve uma redução dos poros de maior diâmetro com o aumento da densidade do solo. Esses resultados são similares aos obtidos por SILVA et al. (1994), TORMENA et al. (2007) e PEREIRA et al. (2010), na determinação do IHO.

A resistência à penetração tem sido reportada como o limite crítico que mais frequentemente reduz o IHO sob condições de secagem do solo (SILVA et al., 1994; KAISER et al., 2009). Esta foi a responsável pelo limite inferior do IHO, no NVd, para densidades do solo acima de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0-10 cm; acima de $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ para camada de 10-20 cm, acima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ para as camadas de 20-40 e acima de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ para a camada de 40-60 cm.

No Neossolo Regolítico Eutroúmbrio típico (Figura 22), o IHO também foi reduzido com o aumento dos valores da D_s , conforme também observado no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e no Nitossolo Vermelho Distrófico típico.

O limite superior do IHO foi estabelecido pela θ_{CC} . Embora tenha havido uma diminuição da θ_{PA} com o aumento da densidade do solo, não houve alteração da retenção de água, podendo-se concluir que o aumento de D_s afetou somente as classes de poros maiores, responsáveis pela aeração. Contudo, dentro da variação de densidade observada, a θ_{PA} em nenhum momento passou a determinar o limite superior do IHO. Segundo MULLER (2002), isso indica que este solo apresenta uma distribuição de porosidade que favorece muito a aeração, fator positivo do ponto de vista de crescimento radicular, e que as classes de poros responsáveis pela retenção de água, praticamente, não sofrem alterações pelo adensamento do solo.

O limite inferior do IHO foi determinado pela θ_{PMP} até a densidade do solo de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$; $1,07 \text{ Mg m}^{-3}$; $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, nas camadas 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Em densidades maiores que esses valores, o limite inferior do IHO passa a ser a umidade em que a resistência do solo à penetração atinge o valor crítico estabelecido ($RP = 3 \text{ MPa}$).

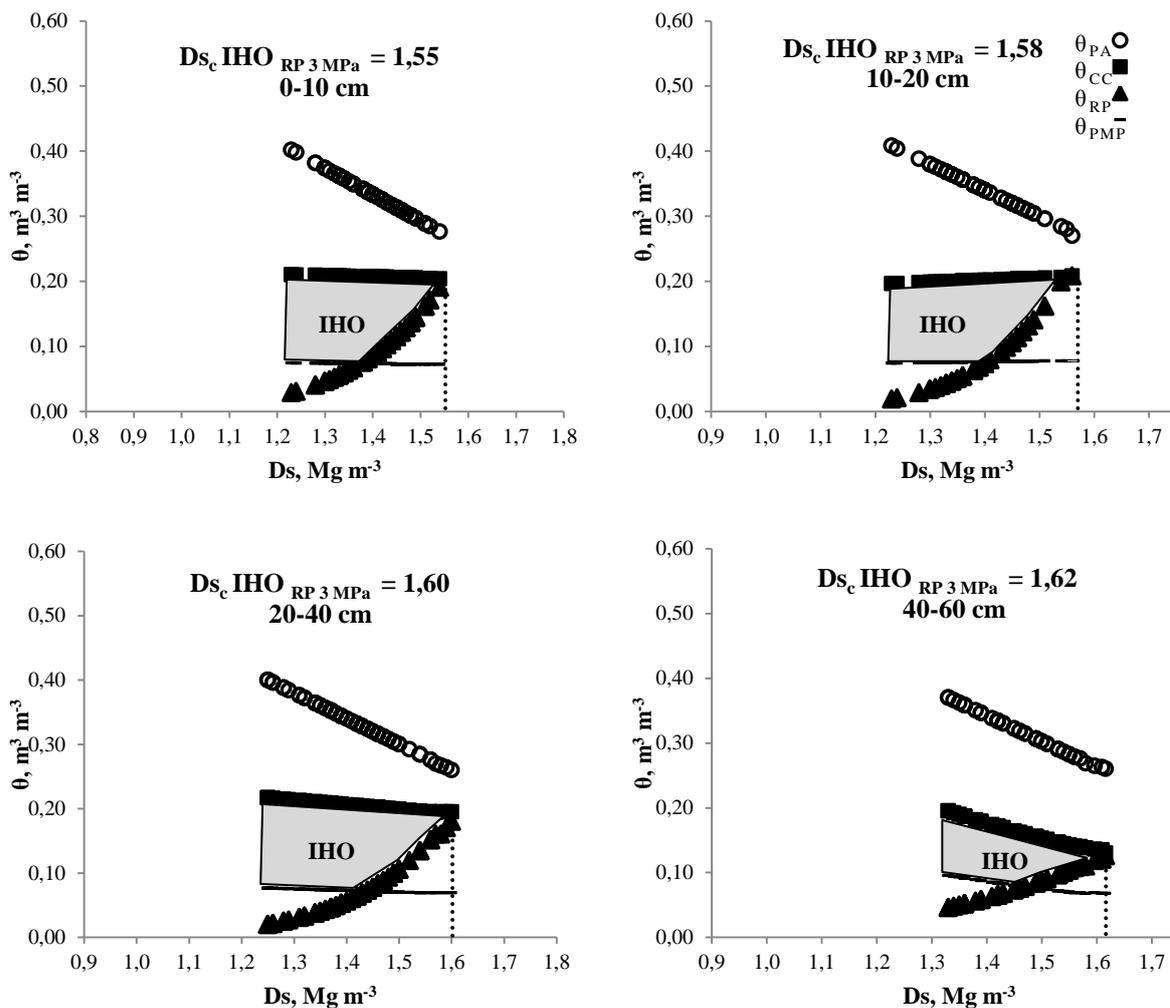


Figura 22 – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Neossolo Regolítico Eutrófico típico (RReh); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP3MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 3 MPa.

As equações que foram 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 são, apresentadas na Tabela 10.

No Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe) a θ variou positivamente com D_s e negativamente com Ψ_m na maioria das camadas. Exceto na camada de 20 a 40 cm em que θ se relacionou negativamente com D_s , entrando em concordância com os resultados de SILVA et al. (1994), LEÃO (2002), SILVA (2003) e SAMPIETRO (2013). O sinal positivo do termo referente à D_s no modelo indica que seu efeito foi positivo na retenção de água, ou seja, houve maior retenção de água com o aumento da D_s , resultados também observados por

TORMENA et al. (1998) e MULLER (2002). Este fato pode ser atribuído a uma mudança na porosidade do solo com o aumento da densidade, que provoca uma redistribuição dos tamanhos dos poros, ocasionando uma redução na macroporosidade e um aumento na microporosidade, podendo com isso aumentar a retenção de água em potenciais mais elevados, próximos àqueles da capacidade de campo. No entanto, quanto ao ponto de murcha permanente, o aumento da retenção de água em baixos potenciais com o aumento da D_s é devido à maior quantidade de partículas minerais disponíveis para adsorção de água por unidade de volume.

Neste solo os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 10 a 20 cm e 40 a 60 cm de profundidade. No entanto, a camada de 40 a 60 cm apresentou um R^2 de 0,93, o S_{yx} foi o menor ($0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e com o maior valor F (1670).

No Nitossolo Vermelho Distrófico (NVd), a θ também variou positivamente com D_s e negativamente com Ψ_m , em todas as camadas. Os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 10 a 20 cm e 40 a 60 cm de profundidade, com R^2 de 0,82 e 0,81, respectivamente, sendo que o S_{yx} foi menor na camada de 40-60 cm ($0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e com valor F maior (609).

No Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh), a θ variou negativamente com D_s e com Ψ_m , em todas as camadas, entrando em concordância com os resultados de Silva et al. (1994), em um solo siltoso e com Sampietro (2013) em um Planossolo Háplico Eutrófico, em um Argissolo Vermelho Distrófico, em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e um Cambissolo Háplico Tb Distrófico, destinados ao plantio de *Eucalyptus* sp.

As camadas que apresentaram os melhores ajustes foram as 10 a 20 cm e 40 a 60 cm. No entanto, a camada de 10 a 20 cm foi a que apresentou maior do R^2 (0,91), S_{yx} de $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e maior valor F (2118). Em todos os solos e em todas as camadas, as equações ajustadas foram significativas a 1 %.

Tabela 10 – 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	Syx (%)	Valor F	N
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe						
0 – 10	$\theta = \exp (-2,150 + 0,184 D_s) \Psi_m^{-0,1429}$	0,86	0,03	12	712**	27
10 – 20	$\theta = \exp (-1,955 + 0,0026 D_s) \Psi_m^{-0,1607}$	0,85	0,03	11	1161**	40
20 – 40	$\theta = \exp (-1,724 - 0,1544 D_s) \Psi_m^{-0,1524}$	0,84	0,02	11	988**	36
40 – 60	$\theta = \exp (-3,006 + 0,5641 D_s) \Psi_m^{-0,2072}$	0,93	0,02	8	1670**	27
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd						
0 – 10	$\theta = \exp (-2,994 + 1,075 D_s) \Psi_m^{-0,1308}$	0,82	0,04	12	612**	48
10 – 20	$\theta = \exp (-2,235 + 0,606 D_s) \Psi_m^{-0,0946}$	0,82	0,03	9	281**	59
20 – 40	$\theta = \exp (-2,236 + 0,632 D_s) \Psi_m^{-0,0975}$	0,71	0,07	11	236**	84
40 – 60	$\theta = \exp (-2,096 + 0,627 D_s) \Psi_m^{-0,0598}$	0,81	0,02	5	609**	50
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico –RReh						
0 – 10	$\theta = \exp (-2,398 - 0,095 D_s) \Psi_m^{-0,2069}$	0,81	0,03	17	889**	71
10 – 20	$\theta = \exp (-2,713 - 0,155 D_s) \Psi_m^{-0,194}$	0,91	0,01	10	2118**	53
20 – 40	$\theta = \exp (-2,055 - 0,344 D_s) \Psi_m^{-0,2077}$	0,82	0,02	17	926**	66
40 – 60	$\theta = \exp (-0,382 - 1,434 D_s) \Psi_m^{-0,1422}$	0,84	0,01	10	1576**	44

**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,

Para a determinação do IHO, também foram ajustadas equações para estimar a RP, em função de θ e D_s pelo modelo não-linear de Busscher (1990). Os coeficientes resultantes do ajuste do modelo de resistência do solo à penetração são apresentados na Tabela 11.

Os coeficientes indicaram que a resistência à penetração variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com θ (Tabela

11), concordando com diversos outros estudos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; LEÃO, 2002; KAISER et al., 2009; SAMPIETRO, 2013). Tal fato sugere que, com a redução da umidade e aumento da densidade, há um aumento na resistência mecânica do solo.

Contudo, o conhecimento de qual propriedade do solo está limitando o crescimento das plantas é importante para definir estratégias de manejo do solo com vistas em aumentar o intervalo hídrico ótimo (Silva, 2003). Segundo o autor, quando o limite superior for a

porosidade de aeração e o limite inferior for a resistência à penetração, ações relacionadas com o manejo do solo podem aumentar ou diminuir o intervalo hídrico ótimo. Quando o limite superior e o inferior do intervalo hídrico ótimo são a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, o manejo dado ao solo tem menor influência sobre essas propriedades.

Tabela 11 – 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	Syx (%)	Valor F	N
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico -SXe						
0 – 10	RP = 0,009 $\theta^{-2,328}$ Ds ^{4,8849}	0,76	0,75	39	80**	27
10 – 20	RP = 0,008 $\theta^{-2,008}$ Ds ^{6,099}	0,75	0,58	35	144**	40
20 – 40	RP = 0,009 $\theta^{-2,028}$ Ds ^{5,4095}	0,80	0,54	21	247**	36
40 – 60	RP = 0,005 $\theta^{-1,744}$ Ds ^{7,936}	0,82	0,61	32	124**	27
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd						
0 – 10	Rp=0,342 $\theta^{-0,230}$ Ds ^{6,31309}	0,81	0,59	19	103**	48
10 – 20	Rp=0,111 $\theta^{-3,046}$ Ds ^{7,2678}	0,93	0,75	26	537**	59
20 – 40	Rp=0,108 $\theta^{-1,484}$ Ds ^{5,8841}	0,70	0,90	35	288**	84
40 – 60	Rp=0,016 $\theta^{-2,508}$ Ds ^{8,1836}	0,84	0,78	25	341**	50
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh						
0 – 10	RP = 0,157 $\theta^{-0,557}$ Ds ^{4,6921}	0,72	0,78	30	323**	71
10 – 20	RP = 0,068 $\theta^{-0,616}$ Ds ^{6,4457}	0,72	0,62	24	246**	53
20 – 40	RP = 0,134 $\theta^{-0,523}$ Ds ^{4,7771}	0,66	0,62	31	276**	66
40 – 60	RP = 0,077 $\theta^{-0,798}$ Ds ^{4,2397}	0,61	0,57	28	203**	44

**significativo a 1 %; R²: coef. 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.

Dentre as equações ajustadas para as camadas avaliadas no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, os melhores ajustes ocorreram nas camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm de profundidade, com R² de 0,80 e 0,82, respectivamente (Tabela 11). No entanto, a camada de 20 a 40 cm apresentou Syx menor (0,54 MPa) e valor F maior (247).

No Nitossolo Vermelho Distrófico típico, o melhor ajuste ocorreu na camada de 10 a 20 cm com R^2 de 0,93, S_{yx} de 0,75 e valor F de 537.

Para o Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico, as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm tiveram os maiores valores de R^2 (0,72 para ambas), porém maior valor F (323) foi da primeira camada citada.

Ao recalculer o IHO para valores de RP crítica de 2 MPa (Apêndices B, C e D), observou-se que a amplitude da faixa de umidade do IHO de todos os solos foi diminuída. Observou-se que no SXe e no NVd o valor de $D_{s_c}IHO$ diminuiu em torno de 5 % para as quatro camadas de profundidade. Já no RReh, a redução do valor de $D_{s_c}IHO$ foi, em média, 9 %. No entanto, a θ_{RP} continuou sendo o LI quando o IHO é igual a zero (Tabela 12).

Tabela 12 – Valores de densidade crítica ($D_{s_c}IHO$) e limites superior (LS) e inferior (LI) para o intervalo hídrico ótimo 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				
	$D_{s_c}IHO$ ($Mg\ m^{-3}$)	IHO_{MAX}		$IHO = 0$		$D_{s_c}IHO$ ($Mg\ m^{-3}$)	IHO_{MAX}		$IHO = 0$	
		LS	LI	LS	LI		LS	LI	LS	LI
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe)										
0 – 10	1,48	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
10 – 20	1,56	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
20 – 40	1,59	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
40 – 60	1,57	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{RP}	θ_{PA}	θ_{RP}
Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd)										
0 – 10	1,24	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
10 – 20	1,32	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
20 – 40	1,29	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
40 – 60	1,32	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{PA}	θ_{RP}
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh)										
0 – 10	1,43	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
10 – 20	1,45	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
20 – 40	1,41	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}
40 – 60	1,51	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{RP}		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.

Para alguns autores a resistência do solo à penetração tem sido apontada como a principal restrição física ao crescimento radicular das plantas (STRECK, 2003; COLLARES et al., 2006; KAISER et al.; 2009).

A densidade crítica do solo (IHO é nulo) obtida por meio do IHO auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo (KAISER et al. 2009).

Comparando-se os dados de todos os solos analisados, o NVd foi o que apresentou os menores valores de D_{s_cIHO} . Este fato deve-se a D_{s_cIHO} ter se relacionado negativamente com os conteúdos de argila (Tabela 12), e, como este solo apresenta maiores conteúdos de argila (50% de argila) (Figura 14), justifica-se os menores de valores de D_{s_cIHO} . Silva (2003), também verificou resultados semelhantes, em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, em um Latossolo Vermelho Distrófico e em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico com, respectivamente, 120 g kg^{-1} ; 500 g kg^{-1} e 600 g kg^{-1} de argila na camada superficial, onde a D_{s_cIHO} foi de $1,90 \text{ Mg m}^{-3}$ no Argissolo, $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ no Latossolo Vermelho Distrófico e $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ no Latossolo Vermelho Distroférrico típico.

O conteúdo de carbono orgânico apresentou uma moderada correlação negativa com a D_{s_cIHO} corroborando com Sampietro (2013), que em seu estudo encontrou correlação significativa semelhante entre C orgânico e D_{s_cIHO} ($r = -0,61$ para $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$ e $r = -0,56$ para a $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$).

A correlação da D_{s_cIHO} somente foi significativa com o conteúdo de argila, carbono orgânico e com a areia fina (somente em RP de referência de 3 MPa) (Figura 23). Com o conteúdo de silte mais argila a relação também foi negativa, contudo, não foi significativa. Os demais atributos como o silte e a areia grossa apresentaram correlação positiva, mas não significativas.

O conteúdo de argila foi o atributo que apresentou os maiores coeficientes de correlação linear de Pearson, sendo de $-0,73$ (correlação forte) e $-0,90$ (correlação muito forte), para $D_{s_cIHO_{RP2MPa}}$ e $D_{s_cIHO_{RP3MPa}}$, respectivamente (Figura 23a).

Considerando a RP crítica de 3 MPa, em todos os solos, o IHO ficou negativamente correlacionado com a Ds (Figura 24). No SXe, as reduções do IHO, em quase todas as camadas, ocorreram seguindo uma tendência menos abrupta no começo, e depois acentuando-se, a partir de determinado valor de Ds conforme a camada (Figura 24a). No entanto, na camada de 40-60 cm devido à curva de θ_{rp} ser o limite inferior do IHO já nas menores Ds, o declínio do IHO foi de forma quase linear com a Ds. Fato também observado por Silva (2003), em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico e em um Argissolo Vermelho-Amarelo e por Sampietro (2013), em um Cambissolo Háplico Tb Distrófico e um Planossolo Háplico Eutrófico (SXe).

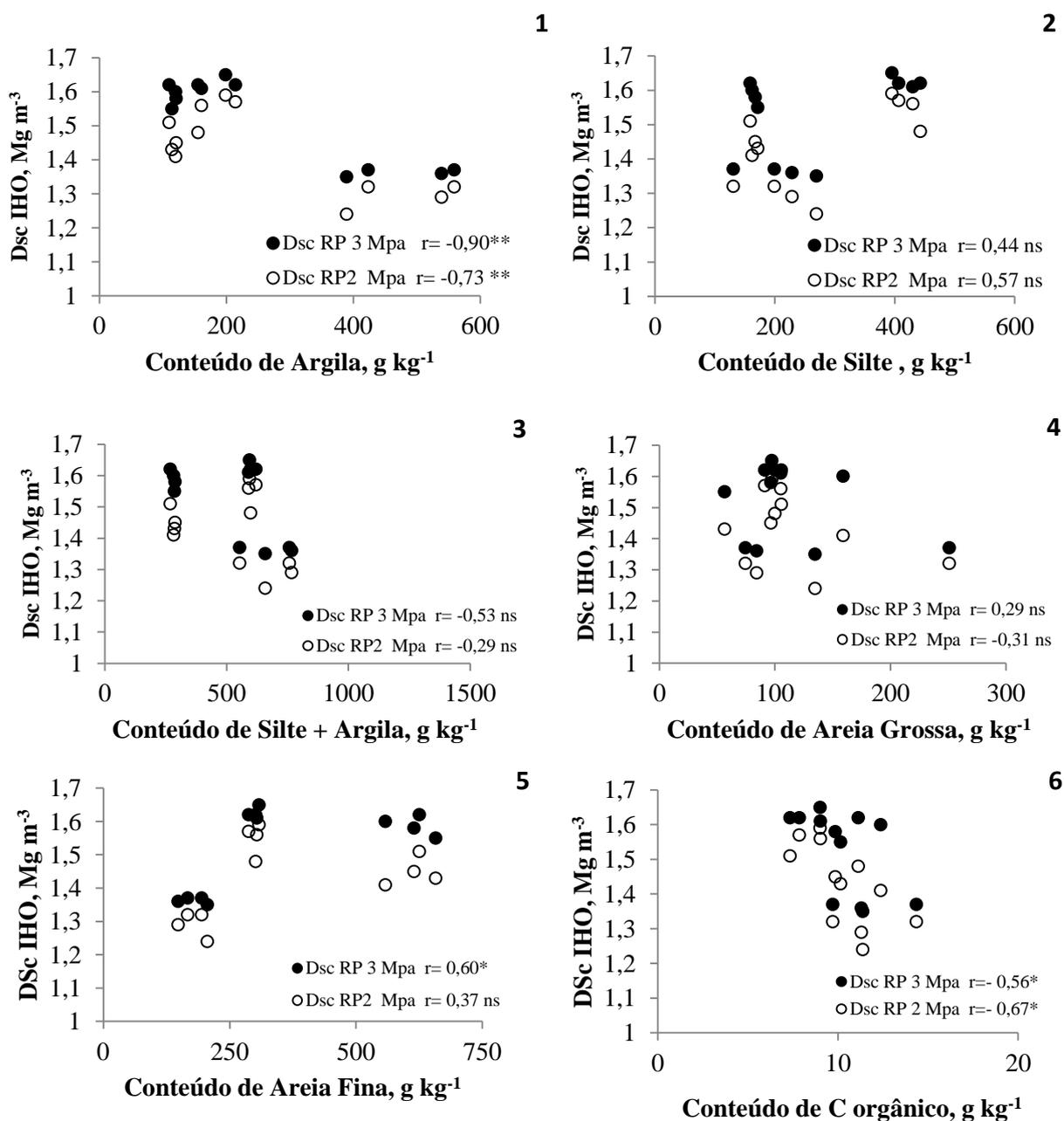


Figura 23 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo crítica, considerando resistência à penetração crítica a 2 MPa ($D_{ScIHO_{RP2MPa}}$) e a 3 MPa ($D_{ScIHO_{RP3MPa}}$), com os conteúdos de argila (1), silte (2), silte + argila (3), areia grossa (4), areia fina (5) e carbono orgânico do solo (6); *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

No NVd (Figura 24 b), as camadas de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm tiveram um leve aumento do IHO até as densidades de 1,25; 1,22 e 1,10 Mg m^{-3} , respectivamente. No entanto, a partir daí diminuíram acentuadamente, devido à curva de resistência do solo.

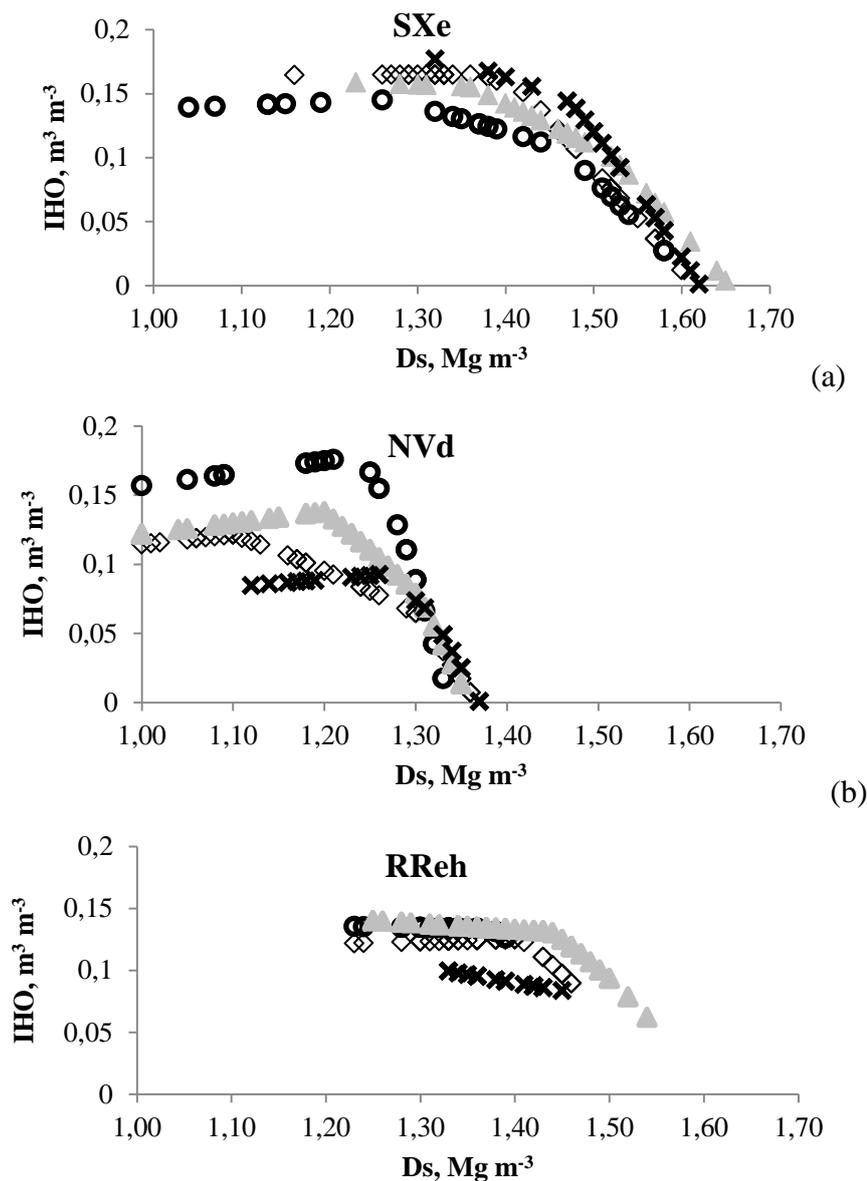


Figura 24 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função da densidade do solo no Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

No RReh, a diminuição do IHO com o aumento da Ds ocorreu de maneira pouco abrupta até a Ds de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0 a 10 cm, $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 10 a 20 cm, $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 20 a 40 cm e $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 40 a 60 cm, então, depois desse ponto acentuou-se devido ao limite inferior passar a ser a θ_{RP} (Figura 24 c).

Quando observamos o conteúdo de água disponível às plantas (AD) (Figura 25), no SXe, verificamos que nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, o aumento de Ds teve pouco ou quase nenhuma influência na AD. No entanto, na camada 20 a 40 cm, com o aumento da Ds

houve uma leve redução da AD e na camada de 40 a 60 cm houve um aumento da AD (Figura 25 a).

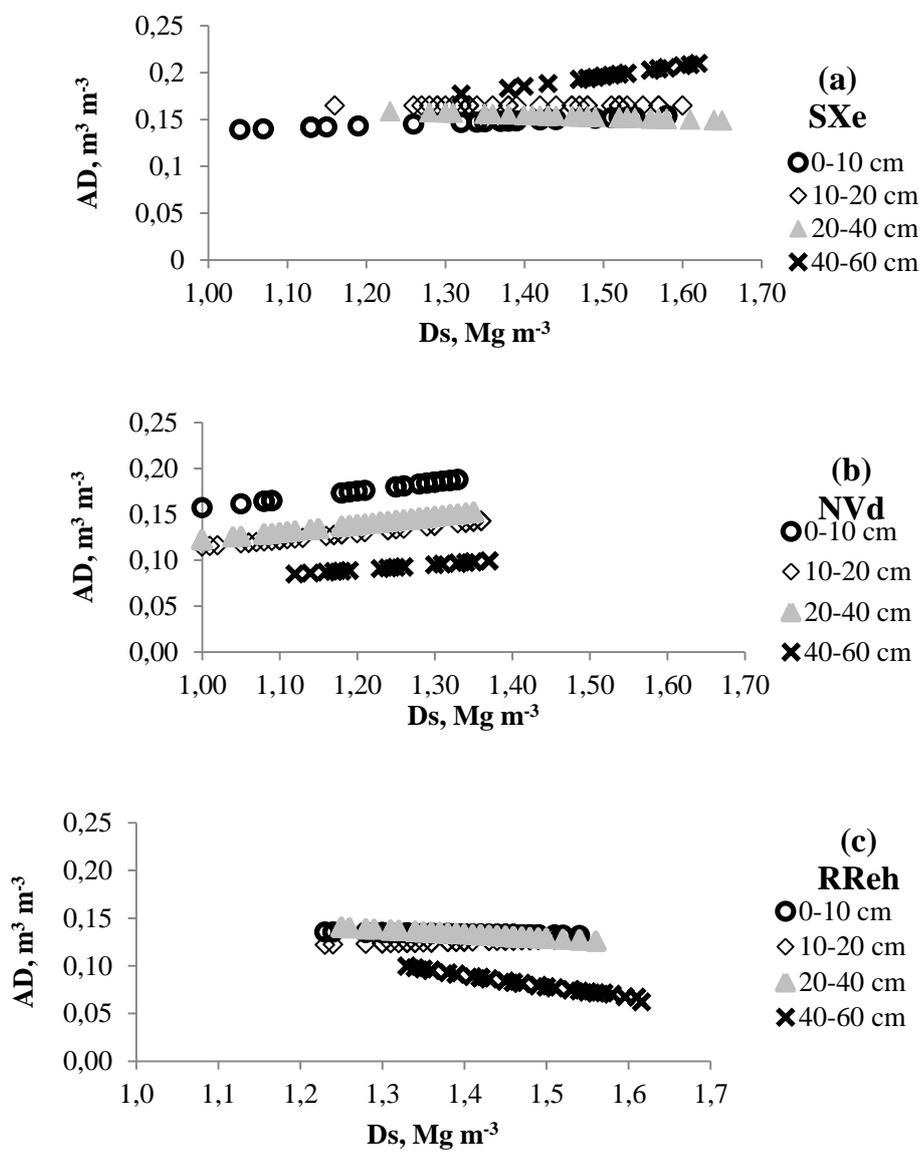


Figura 25 – Variação do conteúdo de água disponível em função da densidade do solo para o SXe, NVd e RReh, nas respectivas camadas avaliadas.

No NVd (Figura 25b), em todas as camadas, a AD aumentou com o aumento da D_s , contrariando Silva (2003), que em seu estudo verificou que o aumento da D_s diminuiu a quantidade de água no solo considerada disponível às plantas.

Já os valores de AD no RReh (Figura 25c), a princípio, não variaram muito com o aumento da Ds. Entretanto, na camada de 40 a 60 cm ocorreu uma diminuição da AD em função do aumento da Ds. Em alguns casos, o aumento da densidade aumenta a quantidade de água contida na faixa de disponibilidade para as plantas aproximadamente entre 0,01 e 0,1 MPa, segundo Sanchez (1981). Entretanto, há casos em que isso não corre, como no trabalho de Stone et al. (1994), que corrobora com este resultado. Esses autores avaliaram a evolução de alguns atributos físico-hídricos de um latossolo vermelho-escuro argiloso, após sete cultivos sucessivos, observaram que a água disponível na camada superficial, 0-0,20 m e na camada de 0,20-0,40 m diminuíram. A interpretação da disponibilidade, contudo, não é simples, uma vez que, a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo podem dificultá-la.

4.3.2 Indicadores de qualidade física e estado de compactação do solo

A densidade do solo tem se mostrado útil como indicador do estado de compactação (CAMPBELL, 1994), uma vez que a compactação aproxima as partículas sólidas, diminuindo o espaço poroso, aumentando, conseqüentemente, a densidade (KLEIN, 2012).

A variabilidade na textura e os impactos dos sistemas de manejo sobre sua estrutura modificam os atributos físicos do solo na zona radicular, promovendo alterações na amplitude do IHO (Silva et al., 1994). Neste contexto, uma redução da Ds implica aumentar o IHO. A base teórica do IHO estabelece que, quanto maior o IHO, mais favoráveis são as condições físicas que o solo oferece para o pleno desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2009).

Contudo, procurou-se analisar o efeito de diferentes Ds sobre indicadores de qualidade física representando o IHO no perfil dos solos em função dos diferentes estados de compactação (Figura 26, 27 e 28).

No Sxe, o aumento da Ds diminuiu a amplitude do IHO no perfil do solo. A menor magnitude do IHO foi no intervalo entre 20 a 40 cm de profundidade (Figura 26) no maior estado de compactação (EC3).

Neste solo, em nenhuma camada o IHO atingiu níveis críticos (IHO nulo), pois seus valores de densidade ainda estão abaixo da densidade considerada crítica para estes solos.

No entanto, no NVd, em diversas camadas e nos três estados de compactação houve camadas onde o IHO foi nulo. Isso pode ser atribuído às suas densidades já terem atingido e alguns casos ultrapassado a densidade crítica deste solo (Tabela 12).

No NVd, a diminuição do IHO foi acentuada com o aumento do estado de compactação (Figura 27). No entanto, a variação do IHO foi similar entre os estados de compactação EC2 e EC3, devido à semelhança entre seus valores de densidades do solo.

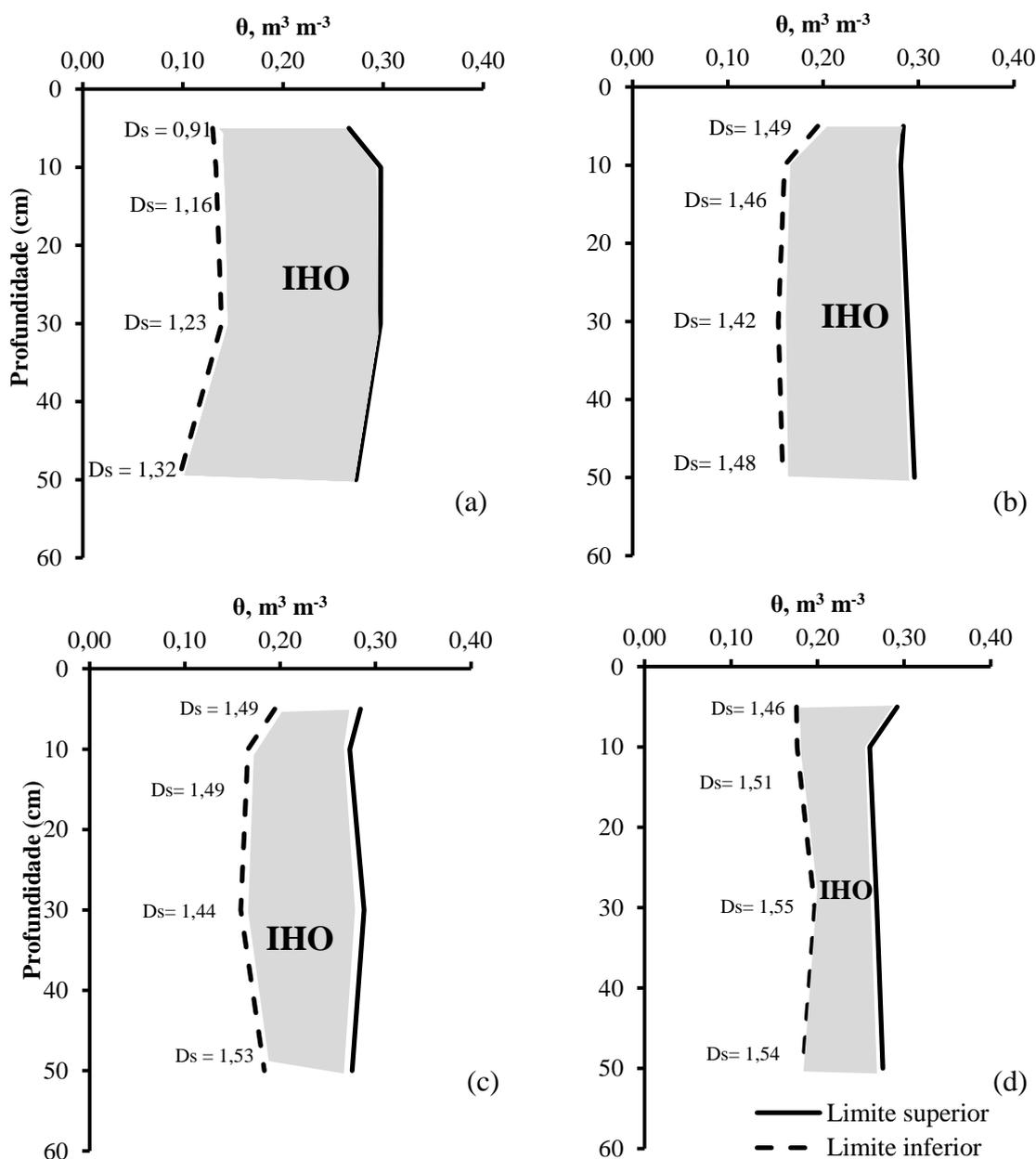


Figura 26 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (Ds) nas quatro camadas do perfil do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.

No NVd, a faixa de IHO é bem menor em comparação ao SXe, sendo que o aumento da D_s (compactação) reduz bruscamente a magnitude do IHO (Figura 26 e 27). Isso se deve a D_s do NVd ser maior que a D_{sc} calculada para este solo. Com isso, nas camadas onde os valores de D_s foram superiores a D_{sc} o IHO foi igual a zero. Kaiser et al. (2009), também observou que a compactação do solo reduz o IHO no perfil do solo explorado pelas raízes, e ainda concluiu que a amplitude de variação e a densidade crítica obtida são dependentes do valor de resistência à penetração considerada limitante.

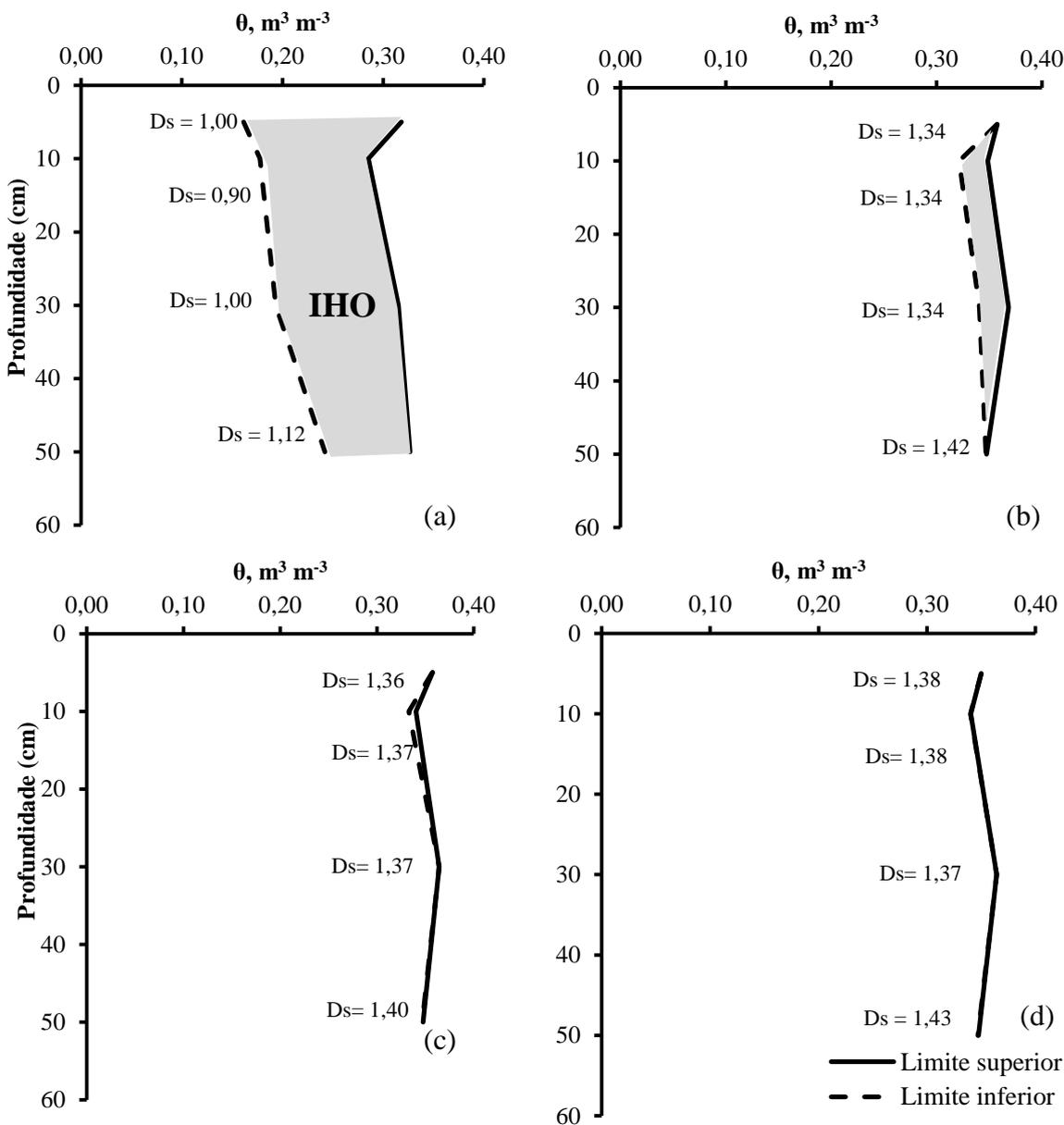


Figura 27 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.

Já no RReh, houve uma menor variação do IHO, quando comparado ao NVd, em função das diferentes condições de D_s nos EC. No entanto, a diferença mais acentuada ocorre da condição de máxima amplitude para a condição de EC 3 (Figura 28).

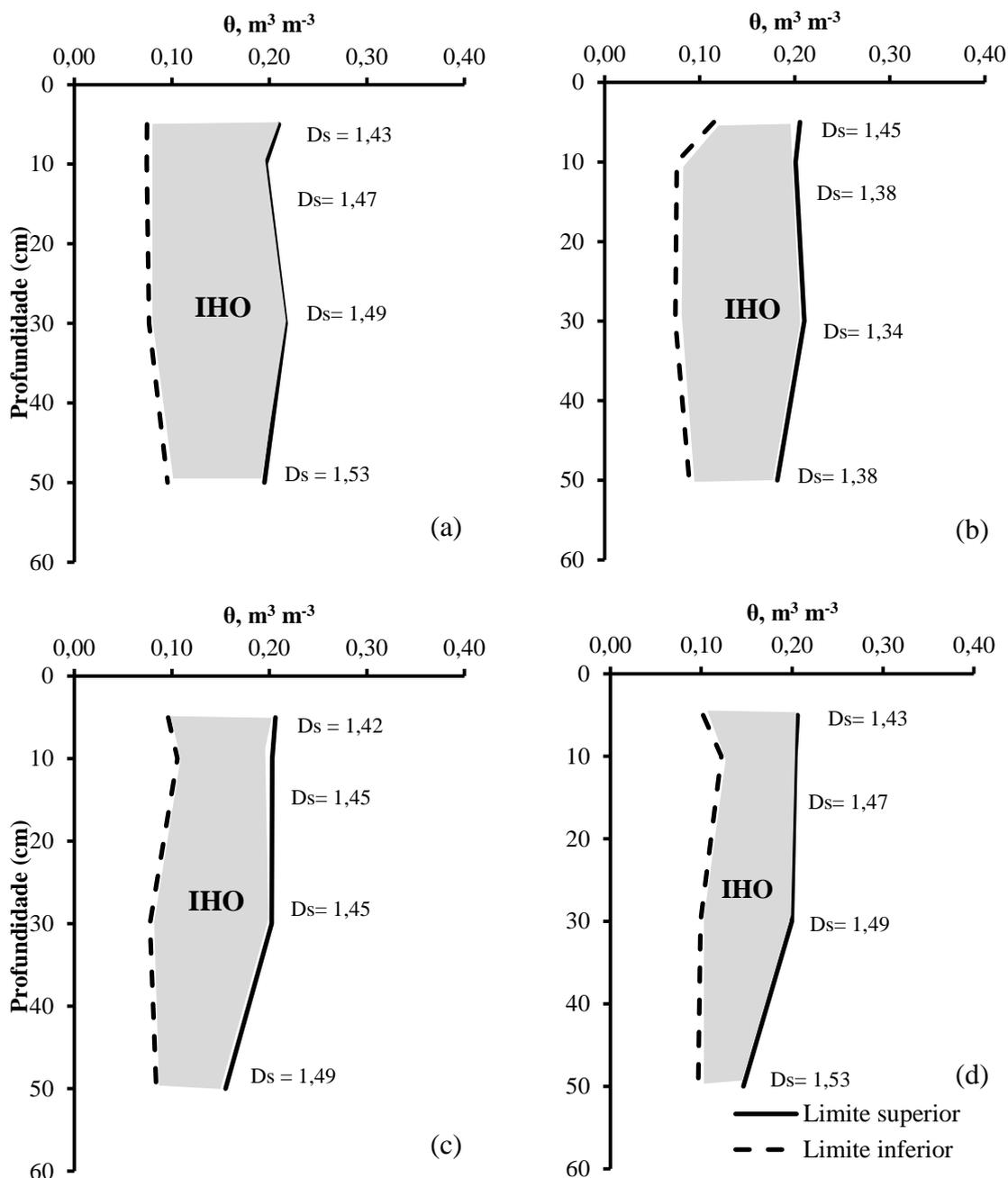


Figura 28 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO), calculado com RP crítica de 3 MPa, em função de diferentes valores de densidade do solo (D_s) nas quatro camadas do perfil do Neossolo Regolítico Eutroúmbrio típico (RReh); (a) IHO em máxima amplitude; (b) EC1; (c) EC2; (d) EC3.

Contudo, a partir destes resultados, verificou-se que o IHO é sensível a degradação estrutural do solo em função da densidade do solo. No entanto, quando buscamos relacionar IHO com crescimento de plantas, correlacionando à hipótese de que plantas cultivadas em solos com IHO pequeno são mais vulneráveis à seca e ao excesso de umidade do solo do que as cultivadas em solos com IHO maior, segundo Gubiani et al., (2013), essa correlação é refutada pela relação do rendimento das plantas com a densidade relativa conforme relação apresentada pelos autores.

Segundo eles, embora alguns autores tenham encontrado pequenas associações entre IHO e resposta das plantas, os mesmos argumentam que o IHO foi fundamentado em processos físicos e fisiológicos, mas representado com base em valores críticos constantes de propriedades hídrico-mecânicas e de espaço poroso. Assim, a intensidade de mudança dos fatores físicos e o efeito dessas mudanças no sincronismo entre as taxas de fornecimento e a demanda dos suprimentos que a planta requer ao longo do ciclo de crescimento não são descritos pelo IHO. Para eles, mesmo que haja relação estreita entre IHO e mudança estrutural, persiste a incerteza sobre como estabelecer uma relação confiável entre produção de plantas e IHO, a fim de que se possa utilizar o IHO para julgar a pertinência de alternativas de descompactação.

4.3.3 Densidade máxima e umidade ótima de compactação

Através do ensaio de Proctor, que determina a relação que existe entre a densidade, conteúdo de água e energia de compactação de um solo com estrutura alterada, foi possível determinar as curvas de compactação dos três solos avaliados (Figura 29).

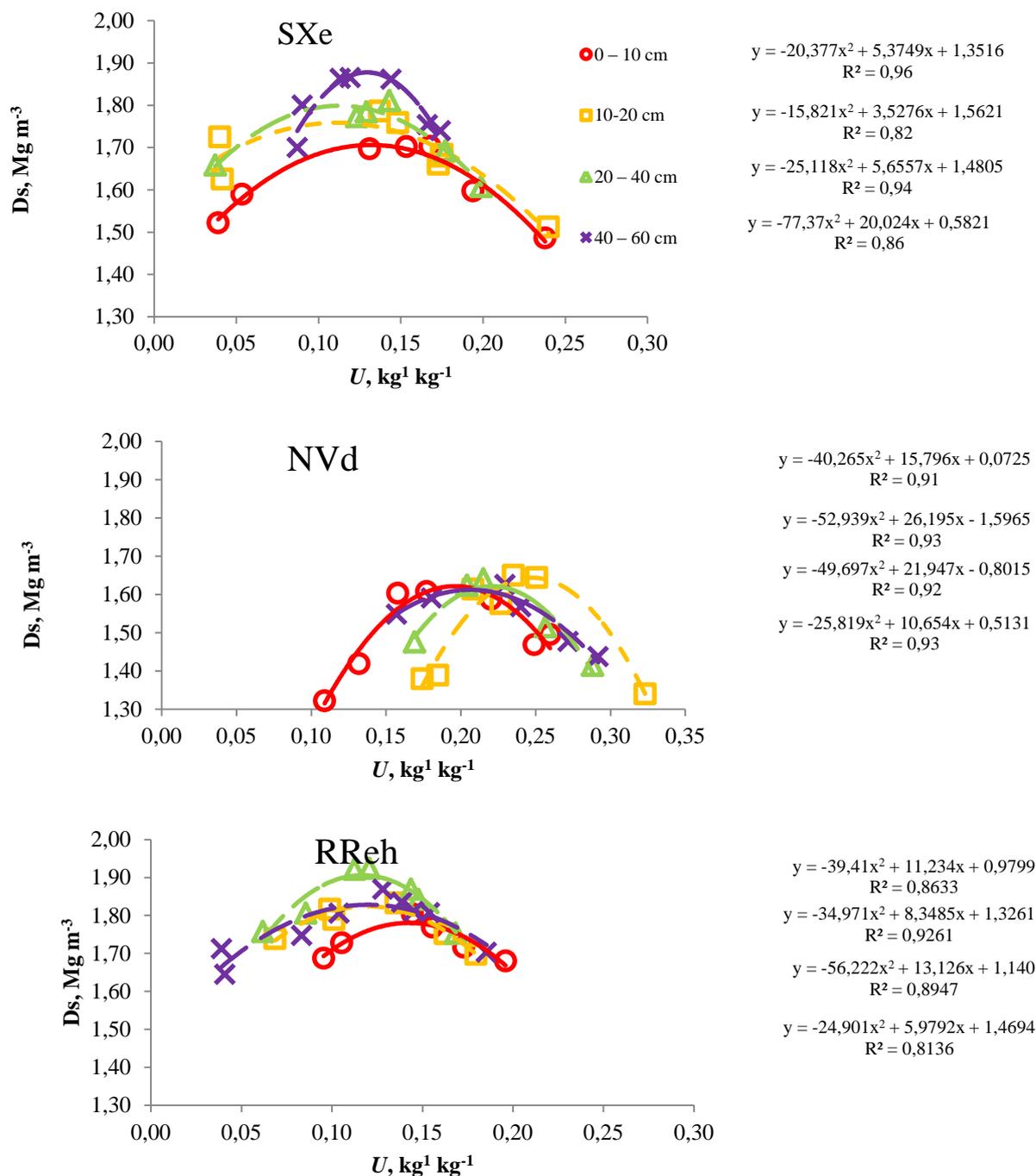


Figura 29 – Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal para os três tipos de solos e respectivas camadas avaliadas, R^2 : coeficiente de determinação.

As curvas de compactação em todos os solos e profundidades apresentaram o mesmo comportamento. À medida que a umidade gravimétrica aumentou, a densidade do solo aumentou também, até atingir um valor máximo (densidade do solo máxima, $D_{S_{MAX}}$). Posteriormente, houve um decréscimo da densidade com o aumento da umidade.

Este processo pode ser explicado levando em conta a grande influência que a água intersticial exerce sobre as partículas de solo. Na parte seca da curva de compactação, onde o solo possui baixa umidade, a água dos seus poros está retida sob efeito capilar e a tensão da água tende a aglutinar o solo mediante a coesão, impedindo a sua desintegração e o movimento relativo das partículas para um novo rearranjo.

À medida que aumenta o teor de água, essa provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto. A partir de certo teor de água a compactação não consegue mais expulsar o ar dos poros, bem como a presença de água livre, que absorve parte considerável da energia de compactação aplicada, dificulta a compactação (BUENO; VILAR, 1998; PINTO, 2002; KLEIN, 2012).

Analisando-se as curvas de compactação do SXe (Figura 29), teve um R^2 que variou de 0,82 a 0,96, sendo a curva de compactação da camada de 0 a 10 cm foi a que apresentou menor valor de $D_{S_{MAX}}$ ($1,71 \text{ Mg m}^{-3}$). Neste solo, a $D_{S_{MAX}}$ foi aumentando com a profundidade, provavelmente influenciada pela redução da matéria orgânica em profundidade, uma vez que, a matéria orgânica afeta negativamente a densidade máxima do solo.

No NVd (Figura 29), o R^2 variou de 0,91 a 0,93 e a curva de compactação que apresentou maior $D_{S_{MAX}}$ ($1,64 \text{ Mg m}^{-3}$) e de umidade ótima de compactação, foi a camada de 10 a 20 cm. Neste solo observou-se também que os valores da $D_{S_{MAX}}$ foram inferior aos demais solos avaliados (SXe e RReh) provavelmente devido a sua composição mineral. Pois, segundo KLEIN (2012), solos argilosos apresentam densidade menor que solos arenosos.

Já no RReh, o R^2 variou 0,81 a 0,93 e a camada de 0 a 10 cm foi a que apresentou menor $D_{S_{MAX}}$ ($1,78 \text{ Mg m}^{-3}$) e maior umidade ótima de compactação .

Considerando a equação polinomial de segundo grau gerada para cada profundidade (Figura 29) determinou-se a umidade gravimétrica ótima e a densidade máxima de compactação (Tabela 13) para cada solo.

Tabela 13 – Densidade máxima ($D_{S_{MAX}}$) e umidade ótima de compactação (U_{oc}) para os três 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	1,71	1,76	1,80	1,88	0,13	0,11	0,11	0,13
NVd	1,62	1,64	1,62	1,61	0,20	0,25	0,22	0,21
RReh	1,78	1,82	1,91	1,83	0,14	0,12	0,12	0,12

A relação entre o conteúdo de argila e $D_{s_{MAX}}$ dos solos em estudo (Figura 30a) foi negativa e significativa, entrando em concordância com os resultados encontrados por REICHARDT; TIMM (2004); LIBARDI, (2005) e MENTGES et al, (2007). Este fato se deve a característica da argila ser mais reativa que a areia, sendo capaz de interagir mais com a água, diminuindo seu efeito lubrificante entre as partículas minerais, assim como é capaz de apresentar maior coesão, diminuindo a suscetibilidade à compactação do solo (BRAIDA, 2004).

A $D_{s_{MAX}}$ apresentou também relação significativa com o conteúdo de argila+ silte ($r = -0,71$) (Figura 30c), com os conteúdos de areia fina ($r = 0,72$) (Figura 30d) e com o conteúdo de carbono orgânico ($r = -0,67$) (Figura 30f). No entanto, não apresentou relação significativa com o silte e a areia grossa.

A relação negativa do conteúdo de carbono orgânico com a $D_{s_{MAX}}$ se deve tanto pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, como pelo fato do material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que sólidos do solo (KLEIN, 2012).

A umidade de compactação (U_{gc}), da mesma forma que a $D_{s_{MAX}}$, apresentou relação significativa com o conteúdo de argila (Figura 31a), no entanto, esta relação foi positiva. Já a relação com o conteúdo de argila + silte foi moderada e positiva entre os atributos ($r = 0,55$) (Figura 31b). Com os conteúdos de silte, areia grossa e carbono orgânico, a relação não foi significativa, porém, para o conteúdo de areia fina, a relação foi negativa e significativa ($r = -0,65$) (Figura 31d).

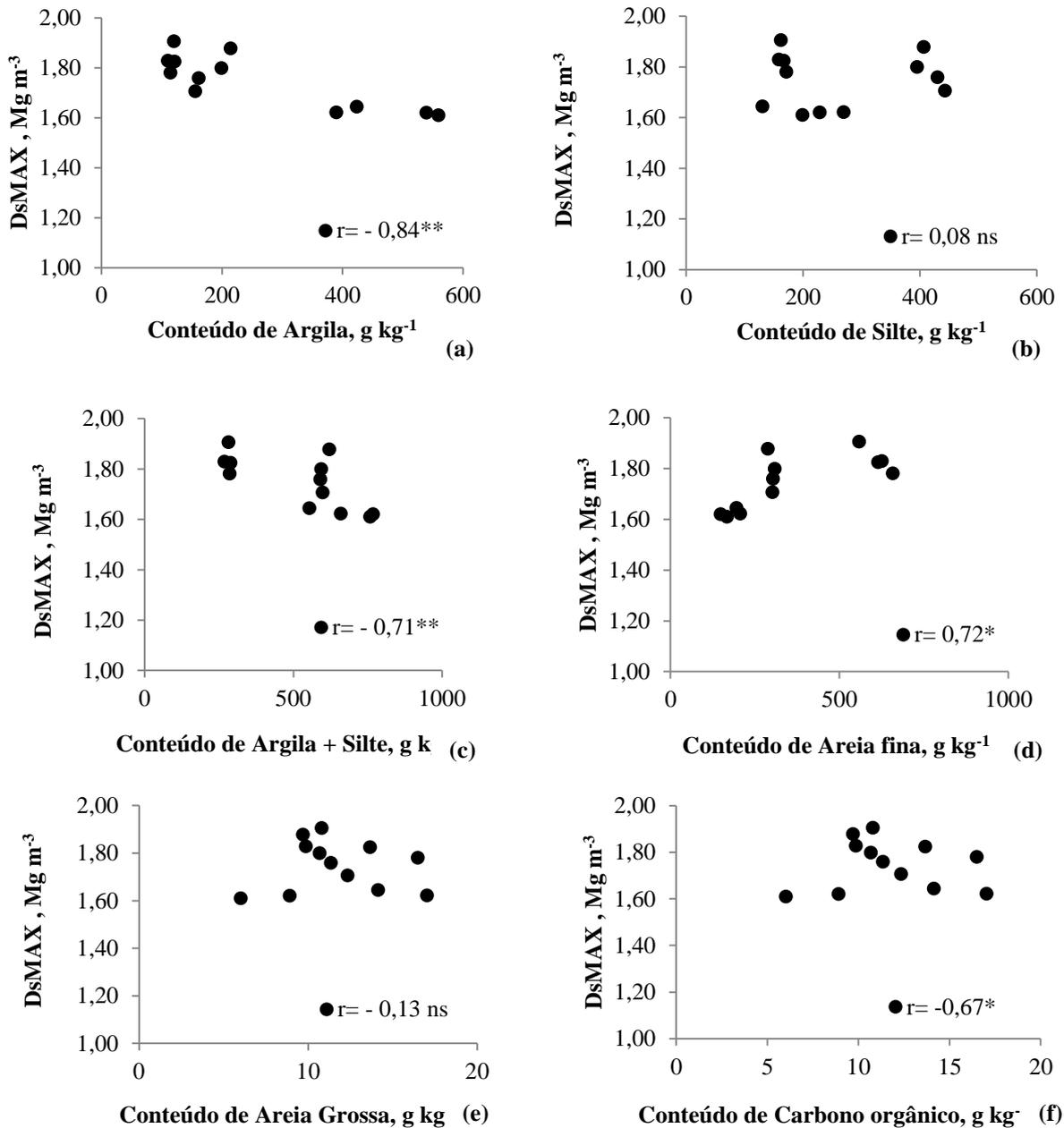


Figura 30 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a densidade do solo máxima com os conteúdos de argila (a), silte (b), argila + silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f), *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

Contudo, segundo Silva et al. (2010), é importante destacar que o conteúdo de água ótimo de compactação representa, na realidade, o conteúdo de água inadequado para a realização de trabalhos com máquinas agrícolas, pois, nessa condição, mais facilmente ocorrem alterações na estrutura do solo, acarretando a compactação.

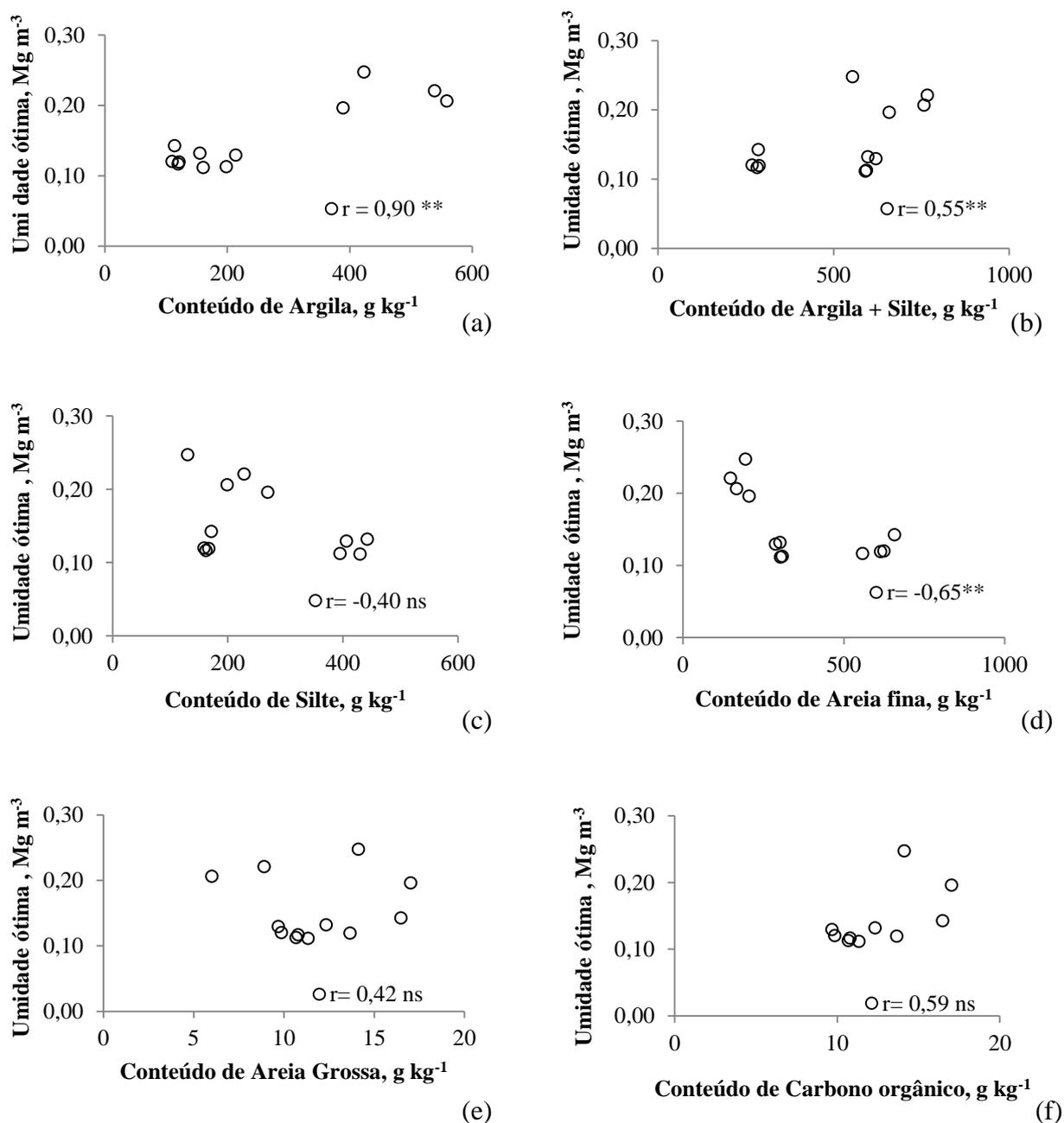


Figura 31 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a umidade ótima de compactação com os conteúdos de argila (a), argila + silte (b), silte (c), areia fina (d), areia grossa (e) e carbono orgânico do solo (f), *significativo a 5%; **significativo a 1%; ns não significativo.

4.3.4 Relação do grau de compactação e densidade crítica do solo

O grau de compactação segundo Klein (2006), consiste entre a divisão da densidade do solo no campo pela densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de proctor. A vantagem

desta relação é que, diferentes solos, podem ser comparados, visto que o efeito da granulometria do solo é eliminado quando se relaciona a densidade atual do solo com a densidade referência. No entanto, o estudo do grau de compactação em áreas florestais ainda é incipiente, e seu estudo em áreas agrícolas ainda apresenta grandes lacunas. Portanto, dada a potencialidade de compactação nesses solos, devem ser feitas mais pesquisas para essas condições considerando o grau de compactação do solo (REICHERT et al., 2007).

Relacionando os valores de $D_{sc_{3MPa}} IHO$, com os valores de $D_{s_{MAX}}$ obtidos pelo ensaio de Proctor (Figura 32), observou-se que a maioria dos valores de GC crítico dos solos avaliados, estão na faixa de 85 a 95 %.

No Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe), com 182 g kg^{-1} de argila, o GC variou de 86 a 95%. No Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd), que apresenta 487 g kg^{-1} de argila, o GC variou de 83 a 85 %. Já o Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh), que apresenta até 60 cm de profundidade 116 g kg^{-1} de argila, o GC variou de 84 a 89 %.

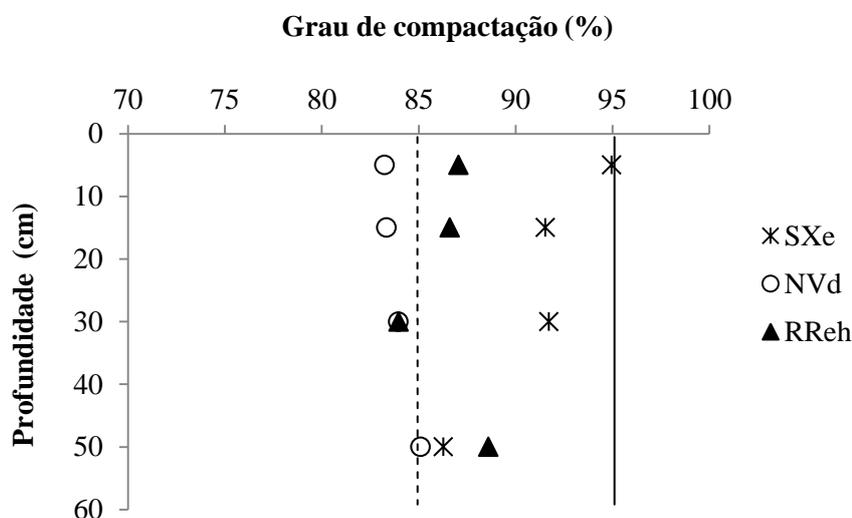


Figura 32 – Grau de compactação considerando a relação $D_{sc_{IHO_{RP3MPa}}}$ e $D_{s_{MAX}}$ para as quatro camadas dos solos avaliados; linhas traceja e sólida indicam grau de compactação a 85 e 95 %, respectivamente.

Utilizando a metodologia do IHO, Klein (2006), encontrou para um Latossolo Vermelho a grau de compactação ótimo de 71% (máximo IHO) e compactação crítica de 88% (IHO=0). Sampietro (2013), também relacionando os valores de $D_{sc_{IHO}}$ com os valores de

$D_{S_{MAX}}$ obtidos pelo ensaio de Proctor, em cinco solos (SXe, PVd, PVAd, SXd e CXbd), verificou que o GC ficou entre 90 a 100 %, resultando num valor médio de 94 %.

Quando relacionamos as densidades dos solos dos diferentes estados de compactação com valores de $D_{S_{MAX}}$ (Figura 33) verificamos que o grau de compactação do SXe na camada superficial (0-10 cm) ficou acima de 85% nos três estados de compactação. As demais camadas ficaram abaixo de 85% com exceção das camadas de 10 a 20 cm e 20 a 40 cm do EC3. No entanto, para este solo o grau de compactação considerado crítico, como podemos verificar na figura 32, não foi atingido em nenhuma profundidade, nos três estados de compactação.

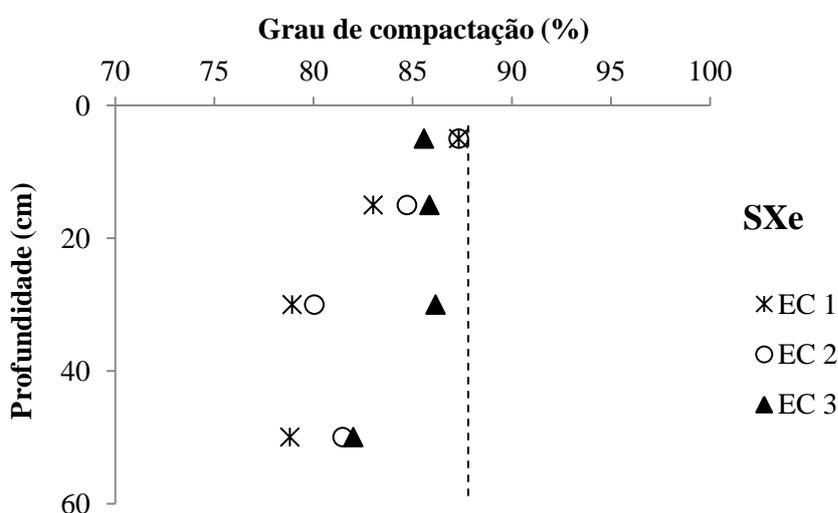


Figura 33 – Grau de compactação considerando a relação Densidade do solo nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3) e a $D_{S_{MAX}}$ para as quatro camadas dos solos do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe).

No NVd o grau de compactação atingiu os valores críticos quando comparados ao grau de compactação, considerando a relação $D_{S_cIHO_{RP3MPa}}$ e $D_{S_{MAX}}$ (Figura 34). Verificou-se que todos os valores do GC, nas 4 camadas, foram iguais ou superiores aos valores em relação $D_{S_cIHO_{RP3MPa}}$ e $D_{S_{MAX}}$. Isso demonstra que, nos três estados de compactação, a condição deste solo já afetaria o desenvolvimento das plantas.

Já no RReh o grau de compactação, em todas as camadas dos diferentes estados de compactação foram inferiores aos valores obtidos da relação entre a $D_{S_cIHO_{RP3MPa}}$ e a $D_{S_{MAX}}$ (Figura 35). Neste solo os valores do GC variaram de 82 a 89%. Freire et al.

(2012), relacionando diferentes graus de compactação e adubação com o crescimento de mudas do gênero *Eucalyptus*, verificaram que o crescimento ótimo foi em um GC de 85 %, sendo que o GC de 95 %, onde houve o menor crescimento de *Eucalyptus*.

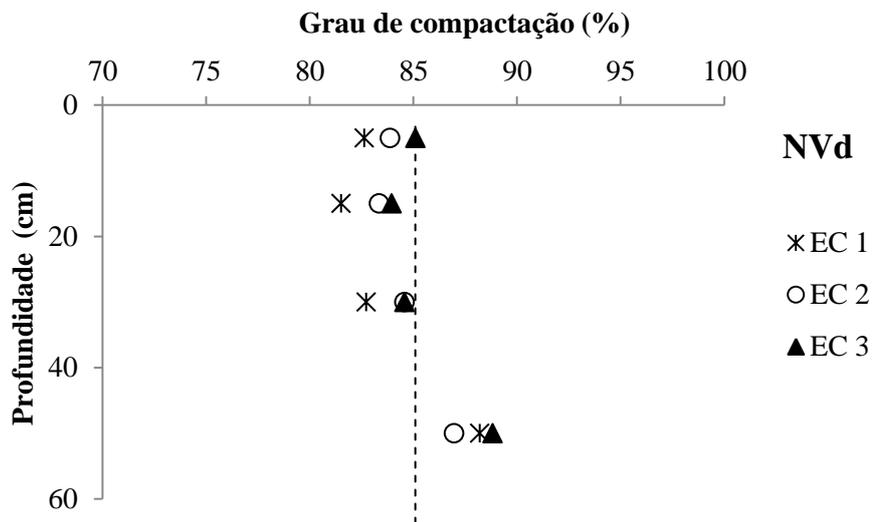


Figura 34 – Grau de compactação considerando a relação nos estados de compactação (EC1, EC2 e EC3) e $D_{S_{MAX}}$ para as quatro camadas do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).

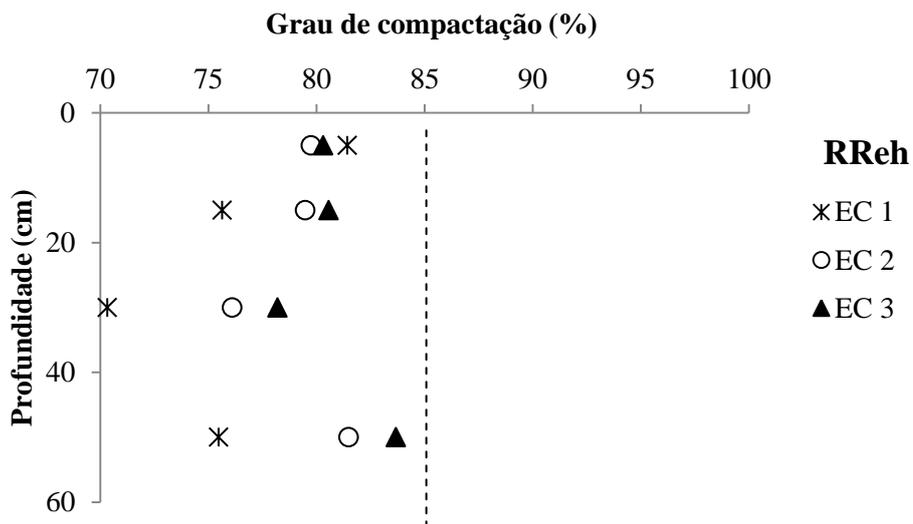


Figura 35 – Grau de compactação considerando a relação Densidade do solo e a $D_{S_{MAX}}$ para as quatro camadas do Neossolo Regolítico Eutroúmbico típico (RReh).

4.4. Influência do estado de compactação na mobilização do solo

A subsolagem é uma técnica utilizada, basicamente, para romper camadas de solo que tenham sofrido compactação ou que são adensadas, mas na área florestal, muitas vezes, é utilizada somente para a mobilização de uma pequena porção de solo para o plantio e o estabelecimento das mudas. Por isso, a compreensão da interação entre o preparo e o meio físico na produtividade florestal é necessária para a interpretação dos resultados experimentais e posterior tomada de decisão, nas diferentes escalas espaciais e temporais (STAPE et al., 2002). Como sua função principal é romper as camadas do solo, maiores que 40 cm de profundidade, acaba provocando o rompimento do solo para frente, para cima e para os lados, formando um corpo tridimensional triangular na linha de preparo (Figura 36).

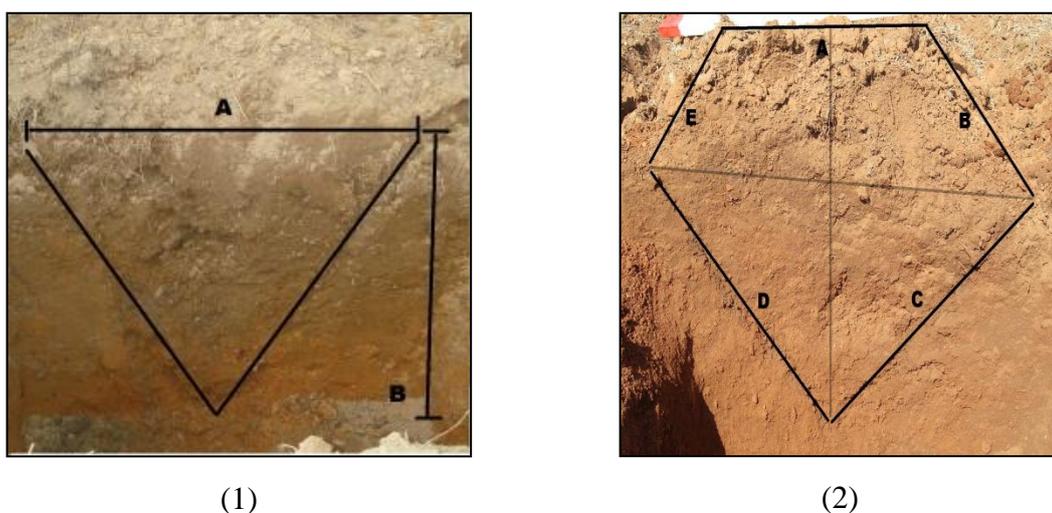


Figura 36 – Efeito triangular do preparo somente com subsolagem (1) e efeito pentagonal no preparo de subsolagem mais camalhão (2).

Contudo, partindo do pressuposto que não existe mais estado de compactação, após a subsolagem do solo e verificando através da análise de cluster (Apêndice E) que o volume de solo mobilizado não variou em função do estado de compactação anterior do solo, consideramos, a partir de agora, somente os tratamentos aplicados.

Assim, podemos observar que o volume de solo mobilizado variou com o tipo de preparo e com o solo (Tabela 14). O preparo de solo que mobilizou maior volume de solo foi a subsolagem a 50 cm mais camalhão, nos três tipos de solo. No entanto, o solo que

apresentou maior volume de solo mobilizado foi o SXe, e posteriormente o RReh. Provavelmente, esse fato se deve a estes solos serem de textura mais arenosa, pois Bentivenha (2003), trabalhando com dois tipos de solo (Latosolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico) observou maior mobilização no solo com textura arenosa.

O NVd como é um solo mais argiloso, resiste mais à desagregação porque apresenta maior coesão entre as partículas, que além de dificultar a subsolagem, facilita a aderência do solo aos implementos, dificultando os trabalhos de mecanização.

A eficiência da subsolagem depende, em boa parte, do teor de água do solo, segundo Nichols e Reaves (1958) apud SASAKI et al. (2002). No entanto os valores de umidade no momento dos preparos não apresentaram grande variação (0,24 kg kg⁻¹ no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico; 0,19 kg kg⁻¹ no Nitossolo Vermelho Distrófico típico e 0,20 kg kg⁻¹ no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico). Bentivenha (2003), em estudo avaliando a mobilização do solo e o desenvolvimento inicial do eucalipto em dois solos distintos, observou que no solo arenoso (Neossolo Quartzarênico) as maiores mobilizações do solo foram obtidas no período úmido. No solo argiloso (Latosolo Vermelho-Amarelo), as maiores mobilizações de solo foram verificadas no período seco.

Tabela 14 – Área da secção transversal de solo mobilizado (ASM) e volume de solo mobilizado (VSM) nos tratamentos de preparo de solo.

Solo	Preparo de solo	ASM (m ²)	VSM (m ³ ha ⁻¹)
SXe	Subsolagem a 70 cm + enxada rotativa	0,24 b	680 b
	Subsolagem a 50 cm + enxada rotativa	0,19 b	552 b
	Subsolagem a 50 cm com camalhão	0,44 a	1267 a
CV (%)		8,4	8,4
NVd	Subsolagem a 70 cm + enxada rotativa	0,21 ab	603 ab
	Subsolagem a 50 cm + enxada rotativa	0,14 b	413 b
	Subsolagem a 50 cm com camalhão	0,26 a	742 a
CV(%)		12,1	12,1
RReh	Subsolagem a 70 cm + enxada rotativa	0,20 ab	564 ab
	Subsolagem a 50 cm + enxada rotativa	0,17 b	469 b
	Subsolagem a 50 cm com camalhão	0,29 a	837 a
CV(%)		17,2	18,1

Contudo, verifica-se que a atividade de preparo do solo variou de acordo com as características dos solos, umidade e tipo de preparo.

Embora os resultados mais conclusivos sobre a produtividade da floresta devam ser analisados em períodos mais tardios, a avaliação do crescimento inicial das plantas é fundamental para verificar se as plantas foram afetadas pelos tratamentos propostos, e segundo Souza (2002), o crescimento das plantas é um dos melhores indicadores de qualidade do preparo de solo.

4.5 Crescimento inicial do *Eucalyptus saligna* Smith em função do tipo de preparo.

O crescimento inicial do *Eucalyptus saligna*, entendido como o período entre o plantio e o fechamento das copas, foi avaliado no período de 24 meses. Para eucalipto nos espaçamentos de 6 a 9 m²/planta, o crescimento inicial é considerado entre 1 a 2 anos de plantio (STAPE et al., 2002).

A análise da variância para a porcentagem de sobrevivência do *Eucalyptus saligna* não demonstrou interação significativa do tipo de preparo versus idade ou tratamento, por isso, estão somente apresentadas às médias de sobrevivência (Tabela 15).

Tabela 15 – Índice de sobrevivência (%) em povoamentos de *Eucalyptus saligna* em diferentes solos e preparo de solo.

Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe				
Tratamento	Idade (meses)			
	6	12	18	24
S 50	94	94	91	91
S 50C	98	98	97	96
S 70	97	95	92	92
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd				
Tratamento	Idade (meses)			
	6	12	18	24
S 50	97	97	95	95
S 50C	96	96	96	96
S 70	93	93	92	92
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh				
Tratamento	Idade (meses)			
	6	12	18	24
S 50	98	98	98	98
S 50C	99	96	95	95
S 70	98	98	98	98

O solo que apresentou, em geral, maior sobrevivência foi o Neossolo Regolítico. No SXe durante o primeiro período invernal, aproximadamente 12 meses após a instalação do experimento, a ocorrência de geadas foi bastante marcante. Provavelmente, a menor sobrevivência no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, em comparação aos demais solos, se deve as injúrias causadas pela Geada (Figura 37) que atingiu a região em 2012, sendo considerado um ano atípico devido às baixas temperaturas. O comportamento da espécie foi avaliado através dos danos causados à parte aérea do vegetal. O efeito das geadas caracterizou-se também pela incidência bem flagrante a partir do terço superior das copas de queima, chegando-se a casos extremos em que toda a copa ficou completamente queimada e ocasionou a morte da planta.

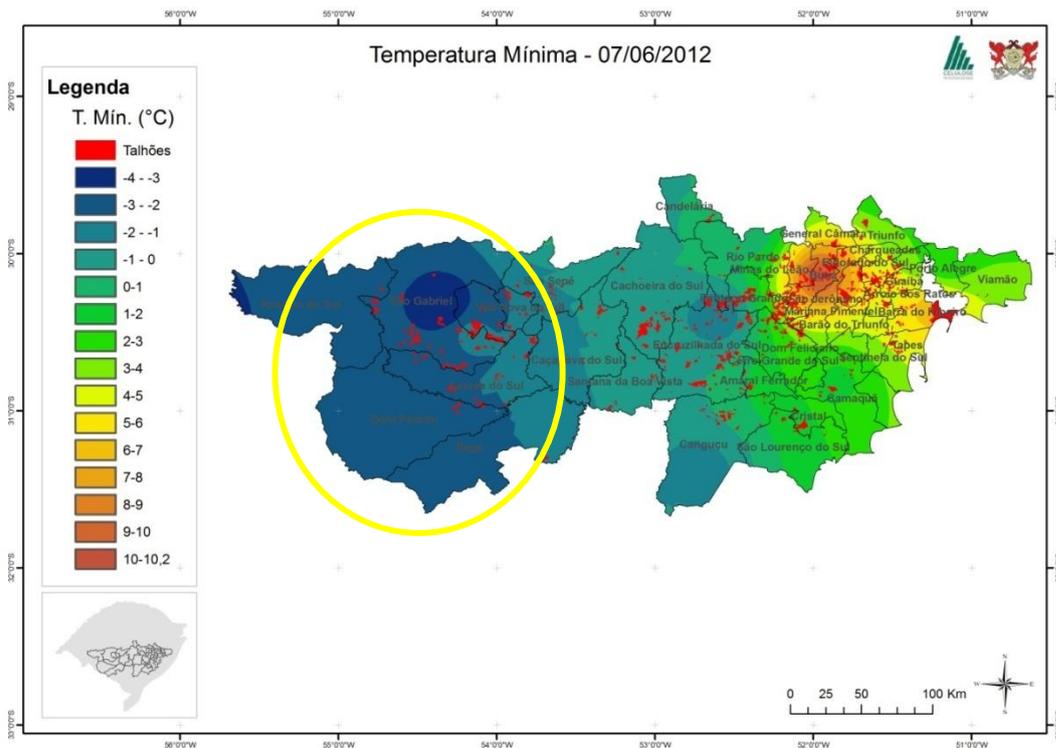


Figura 37 – Temperaturas atingidas nas áreas da CMPC na geada de Junho de 2012.

Fonte: CMPC/UFV

O índice de sobrevivência, nos 3 tipos de solos, não apresentou diferenças significativas ao nível de probabilidade de 5% de erro.

Estudando o efeito da intensidade de preparo na sobrevivência e crescimento inicial de povoamentos florestais mistos, Fonseca et al. (2011), observaram que as condições do solo

foram determinadas pelas técnicas de preparo do solo, e esta influenciou significativamente na mortalidade e crescimento das espécies florestais. Ressaltam ainda que, a espessura efetiva do solo teve importância especial e que a relação entre o crescimento da planta e profundidade do solo aumentou com o tempo.

Ao analisar as alturas das árvores nos diferentes preparos, observou-se a interação entre os preparos e as idades. O crescimento em altura das árvores foi influenciado pelo preparo do solo (Tabela 16). No SXe as maiores alturas observadas, em todas as idades, foram no tratamento com subsolagem a 50 cm mais camalhão. Prevedello et al. (2013), avaliando o preparo do solo sobre o crescimento do *Eucalyptus grandis*, em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, observaram que o manejo do solo com mobilização (enxada rotativa), mesmo revolvendo somente as camadas mais superficiais do solo (0-20 cm), favoreceu o desenvolvimento e crescimento das plantas de eucalipto, inclusive quando comparado com os tratamentos escarificados que promovem o revolvimento do solo em maiores profundidades (0-30 cm). Essas características adquiridas pelo solo, após a aplicação do manejo, segundo os autores, também refletiram no índice de sobrevivência das plantas. Os autores ainda evidenciaram a importância do revolvimento do solo, no início do desenvolvimento das mudas. Segundo Schneider e Schneider (2008), o crescimento longitudinal (altura) é mais importante durante a juventude, e o crescimento diametral durante a fase de madurez da árvore.

Outro fator relevante, em relação ao tratamento com subsolagem a 50 cm mais camalhão no Planossolo Háptico, é que para este tipo de solo, que apresenta drenagem imperfeita em períodos de maior precipitação pluviométrica e que conseqüentemente pode apresentar deficiência de oxigênio, o que afetaria o desenvolvimento do eucalipto, o uso de camalhão torna-se eficiente pois apresenta uma micro drenagem eficiente. Costa et al. (2009) constaram alto risco de anoxia em Planossolos no Rio Grande do Sul. Embora o Planossolo possa apresentar algum impedimento físico ao crescimento radicular, acredita-se que este não é suficientemente restritivo ao eucalipto.

No NVd as maiores alturas foram observadas no tratamento com subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa, entretanto, as diferenças só foram significativas, estatisticamente, aos 24 meses de idade. Em um experimento realizado em um Argissolo, pela empresa Suzano-Bahia Sul, foram feitas avaliações de crescimento do eucalipto aos 12 meses de idade, procurando analisar o efeito da profundidade da subsolagem em diferentes condições de solo. Estes verificaram que a subsolagem mais profunda reduziu a Ds a valores mais baixos que a Dsc,

possibilitando o crescimento em altura maior do que a subsolagem menos profunda (Souza et al., 2001).

Tabela 16 – Altura média (m) de *Eucalyptus saligna* nos diferentes tipos de preparo.

Tratamento	Idades (meses)			
	6	12	18	24
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe				
S50	1,80 a	2,95 a	6,49 b	8,60 b
S70	1,81 a	3,03 a	7,56 a	9,68 a
S50C	1,94 a	3,58 a	8,28 a	10,38 a
Nitossolo Vermelho Distrófico típico- NVd				
S50	1,64 a	2,83 a	6,59 a	8,96 b
S70	1,72 a	2,94 a	7,01 a	9,77 a
S50C	1,62 a	2,82 a	6,68 a	9,11 b
Neossolo Regolítico Entroúmbrico típico - RReh				
S50	1,84 a	3,43 a	7,55 a	10,16 a*
S70	2,15 a	3,40 a	7,56 a	10,29 a
S50C	2,19 a	3,71 a	7,60 a	10,15 a

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

No RReh as diferenças entre as alturas médias nos tratamentos não são significativas, estatisticamente.

A partir da análise de variância do DAP é possível verificar que ocorreu interação entre os tratamentos e a época. As médias de DAP nas diferentes épocas e tratamentos estão apresentadas na Tabela 17. No SXe os maiores diâmetros, assim como as alturas médias, encontram-se no tratamento com subsolagem a 50 cm mais camalhão. Já no NVd os maiores DAPs foram observados na subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa. No RReh os diâmetros médios foram maiores nos tratamentos com subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Avaliando os efeitos de quatro métodos de preparo nas propriedades físicas e químicas do solo, na produção de biomassa e na composição mineral de plantação reformada de *Eucalyptus grandis*, Gatto et al. (2003), verificaram que as características dendrométricas, entre as quais estão a sobrevivência e o volume do tronco, foram afetadas de forma significativa pelos sistemas de preparo do solo. De modo geral, houve tendência de aumento

da sobrevivência, da circunferência e da altura da árvore, com reflexo no volume, à medida que se intensificou o preparo do solo.

Tabela 17 – Diâmetro médio (cm) de *Eucalyptus saligna* em diferentes tipos de preparo.

Tratamento	Idades (meses)		
	12	18	24
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe			
S50	2,89 a	6,97 ab	9,61 a
S70	2,61 a	5,86 b	8,26 b
S50C	3,63 a	7,59 a	9,90 a
Nitossolo Vermelho Distrófico típico- NVd			
S50	2,85 a	6,76 b	8,79 b
S70	3,02 a	7,34 a	9,68 a
S50C	2,87 a	7,01 ab	9,04 b
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh			
S50	3,54 b	7,48 b	9,62 b
S70	3,56 b	7,76 ab	10,37 a
S50C	4,11 a	8,03 a	10,60 a

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observando os dados de área basal nos diferentes tratamentos, verificou-se que no SXe e no RReh, novamente, o tratamento subsolagem a 50 cm mais camalhão se destacou, possuindo os maiores valores médios de área basal (Tabela 18). Já no NVd o incremento em área basal foi maior no tratamento subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa.

A sobrevivência e crescimento em Dap do *Eucalyptus grandis*, com reflexos na área basal e no volume, segundo Prevedello et al. (2013), aumentaram à medida que se intensificou o preparo do solo. Para os mesmos, isto pode estar relacionado com o maior desenvolvimento radicular, o qual pode ter favorecido para uma maior absorção de água e de nutrientes pelas plantas.

Tabela 18 – Área basal média ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) de *Eucalyptus saligna* em diferentes tipos de preparo.

Tratamento	Idades (meses)		
	12	18	24
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe			
S50	0,91 a	4,87 ab	8,70 a
S70	0,79 a	3,59 b	6,63 b
S50C	1,32 a	5,35 a	8,86 a
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd			
S50	0,78 a	4,07 b	6,85 b
S70	0,84 a	4,76 a	8,25 a
S50C	0,83 a	4,41 ab	7,24 b
Neossolo Regolítico Entroúmbrico típico - RReh			
S50	1,14 a	4,95 b	8,15 b
S70	1,15 a	5,33 ab	9,47 a
S50C	1,54 a	5,71 a	9,89 a

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Assim, através destas avaliações dendométricas podemos verificar que o melhor preparo de solo para o SXe e RReh foi o tratamento subsolagem a 50 cm mais camalhão. Este tratamento apresentou os maiores incrementos em altura, diâmetro e área basal devido apresentar menores densidades do solo na camada de 0-10 (Tabela 19), os maiores valores de capacidades de campo e água disponível em profundidade (Tabela 20) e pelo fato de favorecer a menor matocompetição (Figura 39).

Nos solos de textura franca e franco arenosa (SXe e RReh, respectivamente) os valores de densidade do solo foram maiores, na maioria das camadas, quando comparado ao solo de textura mais argilosa nos diferentes tratamentos.

No SXe a densidade do solo foi menor na camada de 0-10 cm e nas demais camadas a diferença não foi significativa. Já no NVd a densidade foi menor na camada de 0-10 cm do tratamento S50C e na camada do tratamento S70 40-60 cm, sendo estas diferenças significativas.

A maior redução na densidade após o preparo do solo na camada superficial (0-10 cm), também foi verificado por Prevedello et al. (2013), em um Argissolo. Segundo os autores esta redução aconteceu em função da mobilização e incorporação dos resíduos vegetais pelos implementos utilizados durante o preparo do solo, a qual favoreceu a atividade biológica.

Tabela 19 – Densidade do solo em diferentes tipos de preparo do solo em um Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.

Camada (cm)	Tratamento			CV(%)
	S50	S70	S50 C	
Densidade do Solo (g cm⁻³)				
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe				
0-10	1,12 ab	1,31 a	1,05 b	7,2
10-20	1,39 a	1,31 a	1,36 a	3,3
20-40	1,45 a	1,44 a	1,47 a	4,8
40-60	1,48 a	1,48 a	1,47 a	3,5
Nitossolo Vermelho Distrófico típico- NVd				
0-10	1,16 ab	1,18 a	1,05 b	3,7
10-20	1,18 a	1,17 a	1,19 a	11,1
20-40	1,24 a	1,17 a	1,20 a	9,4
40-60	1,41 a	1,24 b	1,29 ab	4,5
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh				
0-10	1,26 a	1,23 a	1,16 b	1,6
10-20	1,35 a	1,38 a	1,22 b	1,7
20-40	1,37 ab	1,38 a	1,28 b	2,3
40-60	1,44 a	1,46 a	1,40 a	1,5

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

No RReh, em todas as camadas, o tratamento que apresentou menor densidade do solo foi o S50C. No entanto, somente na camada de 40-60 cm esta diferença não foi significativa.

Através dos valores de densidade do solo obtidos após os tratamentos (Tabela 19) observamos que a subsolagem foi efetiva na maioria das camadas dos solos avaliados. Quando comparamos estas densidades com os valores encontrados antes do preparo (Tabela 7) podemos verificar que houve em média, até 60 cm de profundidade, uma redução de 9% da densidade do solo no tratamento S50, 7% no S70 e 15% no S50C no SXe. As menores diferenças observadas nos tratamentos S50 e S70 se devem ao fato de que nas camadas mais profundas (20-40 cm e 40-60 cm) deste solo a subsolagem não foi tão eficiente.

No NVd houve uma redução de 9% da densidade do solo no tratamento S50, 13% no S70 e 14% no S50C. No entanto, neste solo a subsolagem foi um pouco mais eficiente nas camadas inferiores do solo. Já no RReh a redução foi de 6% da densidade do solo no tratamento S50, 5% no S70 e 12% no S50C.

Como o grau de compactação dos solos é dependente da densidade, os tratamentos avaliados também alteram o GC (Figura 38). Nos três solos estudados o grau de compactação diminuiu e ficou abaixo de 85% em quase todas as profundidades, exceto no NVd no tratamento S50 na camada de 40-60 cm.

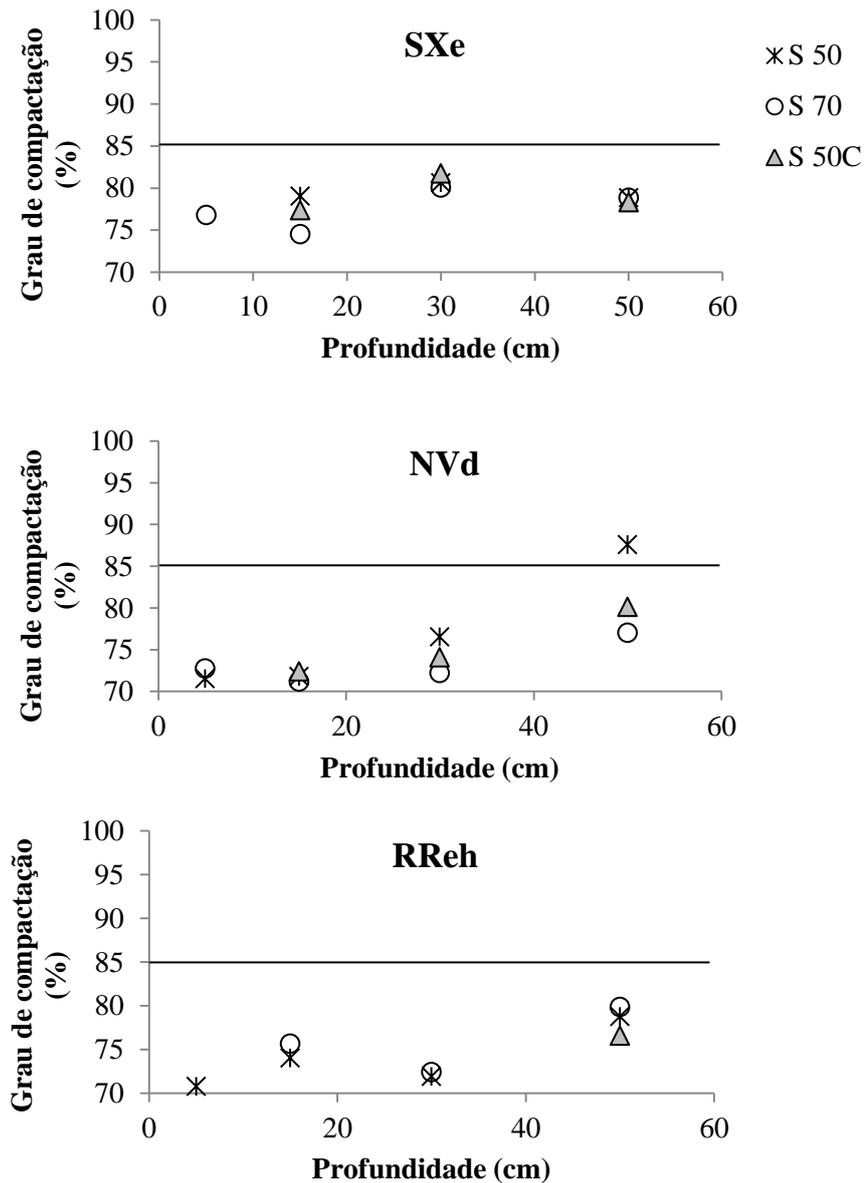


Figura 38 – Grau de compactação considerando a relação entre a densidade do solo nos tratamentos de preparo (S50, S70 e S50C) e a D_{SMAX} para as quatro camadas dos solos do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

A alteração promovida pelo preparo do solo pode ser observada na Tabela 20. Os valores de porosidade total aumentaram quando comparados aos valores antes do preparo do solo. Sendo as maiores porosidades encontradas na camada de 0-10 cm no SXe, nos tratamentos S50 e S50 C. No NVd as porosidades totais também aumentaram, no entanto as maiores porosidades foram nos tratamentos S70 e S50C, mas somente na camada de 40-60 cm houve diferença significativa.

No RReh a porosidade total entre os preparos foi maior em todas as camadas no tratamento S50C, entretanto somente na camada 10-20 cm esta diferença foi significativa.

Cavichiollo et al. (2004), avaliando o preparo do solo com o estado nutricional do *Eucalyptus saligna*, verificou que a porosidade total foi significativamente maior nos tratamentos com sulcagem do solo, na maior profundidade amostrada e que a porosidade total medida na camada de 20 a 30 cm apresentou coeficientes lineares de determinação positivos e maiores que 50%, quando correlacionada com o incremento em altura e DAP ocorrido do primeiro para o segundo ano de crescimento.

Em relação à macroporosidade também houve aumento quando comparada a situação antes do preparo, em todos os solos. As maiores macroporosidades em geral situaram-se na camada superficial (0-10 cm), fato que pode ser atribuído ao maior revolvimento do solo nesta camada, que ocasionou maior fraturamento dos agregados, acréscimo de matéria orgânica e aumento da aeração nesta camada.

Em geral, nos três solos, os efeitos do revolvimento foram mais importantes na superfície do solo, visto que o volume de macroporos tendeu a decrescer com o aumento da profundidade. Este decréscimo em todos os tratamentos se deve ao aumento da densidade do solo, ao menor teor de matéria orgânica, e ao aumento do teor de argila em profundidade (PREVEDELLO et al., 2013; REICHERT et al., 2007).

A microporosidade não variou muito com a profundidade, mas variou com a textura e tipo de preparo do solo. No SXe as maiores microporosidades se encontram no tratamento S50 das camadas 0-10 cm e 10-20 cm. Nas demais camadas não houve diferença significativa. Já no NVd somente na camada de 40-60 cm houve diferença e a maior microporosidade foi no tratamento S50C. No RReh não houve diferença significativa em nenhuma camada amostrada.

Tabela 20 – Porosidade total, macro e microporosidade em diferentes tipos de preparo do solo em um Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico, Nitossolo Vermelho Distrófico típico e Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico.

Camada (cm)	Tratamento			CV(%)
	S50	S70	S50 C	
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,56 a	0,48 b	0,59 a	3,86
10-20	0,48 a	0,50 a	0,49 a	6,37
20-40	0,46 a	0,47 a	0,45 a	6,71
40-60	0,46 a	0,47 a	0,47 a	5,02
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,21 ab	0,18 b	0,27 a	12,66
10-20	0,14 a	0,21 a	0,14 a	20
20-40	0,13 a	0,15 a	0,12 a	17,88
40-60	0,11 a	0,13 a	0,13 a	12,39
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,34 a	0,30b	0,32 ab	4,6
10-20	0,34 a	0,29 b	0,35 a	3,95
20-40	0,33 a	0,32 a	0,33 a	2,71
40-60	0,34 a	0,34 a	0,34 a	6,47
Nitossolo Vermelho Distrófico típico- NVd				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,57 a	0,58 a	0,58 a	6,21
10-20	0,55 a	0,55 a	0,59 a	3,7
20-40	0,55 a	0,57 a	0,57 a	7,67
40-60	0,52 b	0,58 a	0,54 ab	2,36
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,22 a	0,24 a	0,26 a	16,36
10-20	0,17 a	0,20 a	0,22 a	17,72
20-40	0,18 a	0,20 a	0,19 a	26,92
40-60	0,14 b	0,22 a	0,13 b	10,43
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,35 a	0,34 a	0,33 a	4,77
10-20	0,38 a	0,35 a	0,37 a	6,76
20-40	0,38 a	0,36 a	0,39 a	5,84
40-60	0,38 b	0,36 b	0,41 a	1,51
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh				
Porosidade Total (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,51 a	0,52 a	0,54 a	4,41
10-20	0,48 b	0,48 b	0,52 a	1,07
20-40	0,49 a	0,47 a	0,50 a	3,71
40-60	0,45 a	0,46 a	0,48 a	4,46
Macroporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,30 a	0,29 a	0,32 a	10,58
10-20	0,28 a	0,24 a	0,29 a	7,42
20-40	0,27 a	0,25 a	0,28 a	10,96
40-60	0,26 a	0,25 a	0,25 a	9,03
Microporosidade (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,20 a	0,23 a	0,22 a	5,33
10-20	0,21 a	0,24 a	0,23 a	7,21
20-40	0,22 a	0,22 a	0,22 a	15,72
40-60	0,20 a	0,21 a	0,24 a	16,47

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O preparo de solo, além de melhorar a porosidade e aeração do solo pode auxiliar a superação das limitações hídricas dos plantios durante os períodos chuvosos ou com déficit hídrico através de dois efeitos. O primeiro se deve ao aumento da infiltração e a drenagem da água em períodos de precipitação, durante a estação chuvosa, por eliminar o excesso de água e possibilitar melhor aeração do solo para as raízes em crescimento. O preparo com camalhão pode ser um exemplo disto, pois é um preparo que comumente é feito em áreas mais úmidas, sujeita a hidromorfismo em períodos de maior disponibilidade hídrica visando à melhor drenagem e aeração do solo. O segundo efeito é que através da infiltração o preparo contribui para o aumento das reservas de água em subsuperfície que podem ser utilizadas posteriormente em períodos menos chuvosos.

Na Tabela 21 podemos observar como a capacidade de campo, o ponto de murcha e a água disponível variaram com o tipo de preparo de solo. No SXe a capacidade de campo tendeu a ser maior no tratamento S50C e S50, no entanto, somente na camada de 10-20 cm a diferença foi significativa. No NVd a capacidade de campo foi maior nas camadas de 10-20 cm no tratamento S50. No RReh a capacidade de campo foi maior nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do tratamento S50C. Nas demais camadas não houve diferença significativa entre os tratamentos.

Utilizando-se os limites de CC e PMP, verificou-se que a disponibilidade de água no SXe for maior na camada de 0-10 cm. Mas, entre os tratamentos não houve diferenças significativas. No NVd, somente nas camadas de 10-20 cm houve diferença significativa e os maiores volumes de água disponíveis foram nos tratamentos S50 e S50C.

No RReh a água disponível foi maior nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm do tratamento S50C.

Existe relação entre a disponibilidade de água encontrada e a distribuição da matéria orgânica no solo no perfil (Apêndice F, G e H). Tais evidências são reforçadas pelos resultados encontrados por Carpenedo e Mielniczuk (1990), em que a maior armazenagem e disponibilidade de água às plantas, nas camadas mais próximas à superfície do solo, estariam associadas a melhorias da estruturação do solo das primeiras camadas do perfil, pela adição de matéria orgânica na superfície. Conforme Costa (2012), solos com textura mais fina e/ou com maior teor de MO retêm maior conteúdo de água, sendo a MO o principal atributo que governa a disponibilidade de água, principalmente nos horizontes superficiais. Para o autor algumas classes de areia, principalmente as areias muito fina, fina e grossa, possuem maiores efeitos sobre disponibilidade de água do que a fração silte.

Tabela 21 – Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível em diferentes tipos de preparo do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, Argissolo Vermelho Distrófico e Neossolo Regolítico.

Camada (cm)	Tratamento			
	S50	S70	S50 C	CV(%)
Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico - SXe				
Capacidade de campo (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,31 a	0,30 a	0,33 a	5,21
10-20	0,32 a	0,29 b	0,32 ab	3,66
20-40	0,30 a	0,30 a	0,32 a	3,52
40-60	0,33 a	0,31 a	0,32 a	5,03
Ponto de Murcha Permanente (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,09 a	0,09 a	0,12 a	18,46
10-20	0,11 a	0,12 a	0,12 a	33,37
20-40	0,12 a	0,11 a	0,12 a	4,61
40-60	0,15 a	0,15 a	0,16 a	16,84
Água Disponível (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,22 a	0,21 a	0,20 a	11,15
10-20	0,20 a	0,17 a	0,20 a	12,58
20-40	0,19 a	0,19 a	0,20 a	4,22
40-60	0,17 a	0,16 a	0,17 a	16,62
Nitossolo Vermelho Distrófico típico– NVd				
Capacidade de campo (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,33 a	0,30 a	0,31 a	7,93
10-20	0,38 a	0,33 b	0,35 ab	4,32
20-40	0,36 a	0,33 a	0,36 a	7,86
40-60	0,37 a	0,34 a	0,37 a	3,33
Ponto de Murcha Permanente (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,19 a	0,19 a	0,15 b	2,31
10-20	0,23 a	0,21 b	0,18 c	3,26
20-40	0,21 a	0,20 a	0,22 a	10,47
40-60	0,23 a	0,22 b	0,23 ab	2,36
Água Disponível (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,14 a	0,11 a	0,16 a	20,02
10-20	0,16 a	0,12 b	0,18 a	11,22
20-40	0,16 a	0,13 a	0,14 a	9,38
40-60	0,14 a	0,13 a	0,15 a	17,31
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh				
Capacidade de campo (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,18 b	0,18 b	0,21 a	4,59
10-20	0,20 b	0,22 a	0,22 a	1,91
20-40	0,20 a	0,21 a	0,22 a	14,84
40-60	0,19 a	0,21 a	0,20 a	9,23
Ponto de Murcha Permanente (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,06 a	0,07 a	0,06 a	23,24
10-20	0,06 a	0,07 a	0,06 a	21,44
20-40	0,07 a	0,08 a	0,07 a	22,27
40-60	0,05 a	0,07 a	0,05 a	15,26
Água Disponível (cm³ cm⁻³)				
0-10	0,12 b	0,12 b	0,14 a	1,6
10-20	0,13 b	0,13 b	0,16 a	4,8
20-40	0,13 a	0,13 a	0,15 a	9,23
40-60	0,13 a	0,14 a	0,16 a	15,1

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os solos com classes texturais contrastantes, com elevados teores de argila ou de areia, disponibilizam o mesmo conteúdo de AD, embora os arenosos tenham baixa capacidade de campo. Maior conteúdo de AD ocorre em solos das classes com textura franca e com maior teor de MO, enquanto que a menor disponibilidade ocorre em solos da classe areia. No entanto, Reichert et al. (2009), observaram maiores efeitos diretos dos teores de argila e silte sobre a CC e PMP em solos do RS, enquanto que o teor de MO teve pequeno efeito direto.

Nos três tipos de solos empregados observou-se que o tratamento subsolagem a 50 cm mais camalhão foi que apresentou menor matocompetição (Figura 39) (fato observado e não quantificado). Segundo Schneider e Schneider (2008), a competição entre as plantas de interesse com as ervas daninhas por luz, água e nutrientes pode ser considerada como o fator biológico mais importante no manejo da floresta.



Figura 39 – Ilustração da matocompetição observada nos tratamentos subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa (S50) e subsolagem a 50 cm mais camalhão (S50C).

Santos et al. (2005), afirmaram que, em povoamentos de Eucalyptus, a interferência da matocompetição é mais expressiva no primeiro ano de implantação, em especial, pela competição por recursos. Essa competição pode implicar em elevadas perdas na produtividade florestal, com a ausência ou manejo inadequado nos estádios iniciais (SILVA et al., 2000).

Gatto et al. (2003), avaliando tratamentos de preparo verificou o maior crescimento no tratamento mais intensivo do solo, fato atribuído às melhores condições criadas para absorção de nutrientes e de água pelas plantas de eucalipto e pela redução da competição com ervas daninhas. Para os mesmos autores, a infestação por ervas daninhas, em geral, é menor quando se prepara o solo, pois favorece o crescimento inicial das árvores, em razão da redução da competição das mudas com as ervas daninhas por água e nutrientes, principalmente nos estádios iniciais de crescimento.

A preparação adequada do local (como a subsolagem), conservação e armazenamento da água e o controle intensivo da matocompetição pode ser particularmente importante na redução do estresse hídrico em árvores, em alguns locais (STAPE et al., 2010).

O tratamento (S50C) também se destacou no SXe e no RReh por apresentar uma camada rica em raízes finas responsáveis pela absorção de nutrientes (Apêndice I – S50C e Apêndice J – S50C). Segundo Malinovski (1996), a densidade do solo influencia diretamente o crescimento do sistema radicular.

O crescimento radicular é fortemente influenciado pelas condições locais do sítio (textura, estrutura, fertilidade, barreiras físicas e químicas, condições macro e microclimáticas e condições fisiográficas) e pela constituição genética da árvore. Assim, enquanto o hábito de crescimento radicular determina o volume de solo ocupado pelas raízes, a intensidade de raízes (número e distribuição) determina o grau de exploração do volume de solo (GONÇALVES; MELLO, 2000). Contudo, os melhores índices de crescimento do tratamento com camalhão podem ser atribuídos à grande atividade de raízes finas nesta camada (dado observado e não quantificado) (Apêndice I – S50C e Apêndice J – S50C), estimuladas pela maior disponibilidade de nutrientes do solo e pelos processos de ciclagem, via deposição e mineralização da matéria orgânica. Entretanto, a relação direta entre a matéria orgânica do solo e produtividade, provavelmente, não se sustenta em floresta onde as condições umidade ou temperatura limitam decomposição da matéria orgânica do solo (VANCE, 2000).

Segundo Mello (1997), em povoamentos jovens, a distribuição horizontal de raízes é fortemente influenciada pelo tipo de preparo de solo. Schumacher (1995), trabalhando com povoamentos de *Eucalyptus saligna*, *E. dunnii* e *E. globulus*, verificou que nos primeiros 30 cm de profundidade do solo se encontram a maioria das raízes finas das árvores, estas responsáveis pela absorção de água e nutrientes. Este mesmo autor ainda observou que à medida que as raízes finas encontravam uma camada mais adensada, ocorria uma diminuição brusca das mesmas e assim que o solo voltava a apresentar boas condições de permeabilidade ocorria novamente proliferação de raízes finas em camadas mais profundas do perfil do solo.

Entretanto, para o NVd, o melhor tratamento foi o tratamento subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa. Provavelmente, este solo, por ser mais argiloso o tratamento de subsolagem a 50 cm mais camalhão, não apresentou a mesma eficiência dos demais solos porque em períodos de menor disponibilidade hídrica o solo perde mais rápido a umidade nas camadas superiores do perfil, aumentando a resistência a penetração das raízes. As relações entre crescimento das raízes das plantas e resistência à penetração são relatadas por vários autores (COLLARES et al., 2006; KAISER et al., 2009; GUBIANI, 2012).

Estes aspectos são de grande relevância em se tratando de povoamentos clonais de eucaliptos, sobretudo os propagados por macroestaquia, que tem sistema radicular atípico: sem raiz pivotante, mas com várias raízes secundárias espessas, sem a mesma capacidade de aprofundamento das raízes pivotantes (KREJCI et al., 1986).

No entanto, graças às adaptações das árvores nos períodos de déficit hídrico as camadas mais profundas passam a constituir como as principais reservas de água do solo e o preparo mais eficiente para este solo é o mais profundo (S70). Finger (1991), em seu estudo descreveu a produção de povoamentos de *Eucalyptus saligna* implantados em solo de preparo raso e de preparo profundo mostrou diferenças no desenvolvimento das curvas de índice de sítio, onde solos de preparo raso apresentaram curvas mais achatadas do que as obtidas em solos de preparo profundo.

A disponibilidade de água é claramente fundamental para a produtividade da plantação. Vários estudos têm demonstrado relações fortes entre a oferta de água (e uso) e produção de madeira de Eucalipto em todo o mundo, com respostas de crescimento do fuste de 15-35 % (MADEIRA et al., 2002; STAPE et al., 2008) ou ainda maior em condições áridas (HUNTER, 2001).

Contudo, não é possível generalizar os efeitos do preparo para qualquer tipo de solo sem antes ter uma boa compreensão do meio-físico, características morfológicas do solo e dos efeitos potenciais das técnicas usadas para cada tipo de material genético empregado (material de propagação seminal ou clonal) nas diferentes fases do desenvolvimento da planta.

Desta forma, torna-se necessário continuar o monitoramento das alterações nos atributos físicos do solo, bem como as avaliações dendrométricas no decorrer do desenvolvimento do povoamento, para que no final no ciclo possam ser realizadas análises sobre as interações entre o manejo de solo empregado (preparo do solo) com os atributos do solo e os diferentes estágios fisiológicos das plantas (crescimento inicial, povoamento jovem e maduro) e sua produtividade.

5 CONCLUSÕES

- A análise fatorial foi útil como critério estatístico para a identificação de camadas de solo que agrupassem medidas semelhantes de resistência do solo à penetração. As camadas formadas caracterizaram-se por menor variação da resistência à penetração dentro da camada do que entre camadas.

- O uso conjunto da análise fatorial e da variabilidade espacial da RP permitiu identificar, locais com diferentes estados de compactação. Estes resultados apontaram para uma grande potencialidade do mapeamento da compactação do solo como ferramenta prática e rápida para agregar informações sobre as condições físicas do solo em áreas de plantio florestal. Fica validada, portanto, a primeira hipótese.

- A compactação do solo causou modificações no comportamento das curvas de retenção de água, aumentando a retenção de água no solo, mas reduzindo a disponibilidade de água às plantas, conforme previsto na segunda hipótese.

- O intervalo hídrico ótimo (IHO), faixa de umidade não limitante ao crescimento, foi fortemente limitado pela resistência à penetração e pela aeração do solo, nos solos mais argilosos (SXe e NVd). No solo arenoso, os limites do intervalo hídrico ótimo foram a capacidade de campo e a resistência à penetração do solo (RReh). Estes resultados validam a terceira hipótese.

- O solo mais argiloso (NVd) das áreas estudadas, nos maiores estados de compactação, apresentou a densidade do solo superior a densidade crítica (Dsc), com base no IHO, requerendo assim maior cuidado na definição do tipo de preparo de solo para a implantação florestal. Neste caso, aceita-se a quarta hipótese.

- O volume de solo mobilizado no preparo de solo não variou em função do estado de compactação do solo, no entanto variou em função dos tratamentos aplicados. Rejeita-se, portanto, a quinta hipótese.

- O preparo de solo com maior volume de solo mobilizado (subsolagem a 50 cm mais camalhão) favoreceu o melhor desenvolvimento inicial do *Eucalyptus saligna* Smith no SXe e no RReh, confirmando a sexta hipótese. No entanto, no NVd o melhor crescimento foi observado no tratamento de subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e assim neste caso refuta-se a sexta hipótese. A sobrevivência, entretanto, não demonstrou interação significativa com o preparo do solo.

6 RECOMENDAÇÕES

A aplicação do preparo de solo deve ser em função da finalidade, do tipo de solo, de sua textura e do seu estado de compactação.

Assim, antes de qualquer intervenção na área de implantação, recomenda-se fazer um levantamento exploratório das condições estruturais do solo, bem como avaliar a espécie e material genético que pretende se utilizar.

No Nitossolo Vermelho (487 g kg^{-1} de argila), onde a resistência à penetração pode ser mais limitante, a prescrição do preparo de solo contempla a subsolagem do solo a uma profundidade de 70 cm mais enxada rotativa, visando romper as camadas mais compactadas. Neste tipo de solo não é adequado o emprego de um preparo mais intenso nas camadas superficiais, como por exemplo, subsolagem mais camalhão, uma vez que este favorece a drenagem nas camadas superficiais e, em períodos mais secos, acentua a perda de umidade do solo e o aumento da resistência mecânica à penetração em detrimento ao sistema radicular das mudas.

Para os solos mais arenosos (Planossolo Háplico), sujeitos a locais mais úmidos ou em solos que possuem pequena profundidade efetiva para o desenvolvimento do sistema radicular, indica-se o preparo de solo com subsolagem a 50 cm mais camalhão. No entanto, em solos como o RReh, recomenda-se verificar o custo-benefício deste tipo de preparo e as vantagens operacionais, uma vez que, no RReh, poderá também ser utilizado a subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa, mas o emprego desta subsolagem vai depender da profundidade efetiva deste solo.

Recomenda-se especial atenção no momento da definição do conjunto de atividades a ser empregado como preparo do solo, pois este deve ser específico para cada situação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

ABREU, L.S. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. 2000. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:337-345, 2004.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT.NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação - **ABNT**. 1986. NBR 3.Rio de Janeiro, 1986. 11p.

AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5, p. 1-48.

BAPTISTA, J.; LEVIEN, R. Métodos de preparo de solo e sua influência na erosão hídrica e no acúmulo de biomassa da parte aérea de *Eucalyptus Saligna* em um cambissolo háplico da depressão central do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, vol. 34, núm. 4, 2010, pp. 567-575.

BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONLÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização florestal**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestal, 2000. p. 269-286.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. de. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. 330p.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p. 31-41, jan./jun. 2008.

BENTIVENHA, S. R. P. Mobilização do solo e crescimento inicial do eucalipto em função do tipo de haste subsoladora, profundidade de trabalho e características do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 23, n.3, p.588-605, 2003.

BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SASAKI, C. M.; Mobilização do solo e crescimento inicial do eucalipto em função do tipo de haste subsoladora, profundidade de trabalho e características do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 588-605, set./dez. 2003.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 75-87. 2002.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F.; DILY, L. Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 91-95, 2000.

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Lest limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Soc. Am. J.**, v. 62, p. 1384-1393, 1998.

BOLAND, D. J. et al. **Forest trees of Australia**. Melbourne: Nelson: CSIRO, 1984. 687 p.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; COSTA, L.M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um Latossolo com compactação simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:125-130, 1997.

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. 106p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRUN, E. T. **Relações entre a altura dominante e fatores de sítio, em povoamento de *Pinus elliottii* Engelm. na região de Ponte Alta do Norte, SC**. 1979. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1979.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: Eesc-UPS, 1998.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of America Society of Agricultural Engineering**, v. 33, p. 519-524, 1990.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Abril, 1997. 132 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, n. 58, p. 1501-1511, 1994.

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.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, v. 25, p. 183-188, 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:137-147, 2006.

CARVALHAES, E. Florestas plantadas: múltiplos usos e segurança alimentar. **Revista Opiniões**. Jun-Ago. 2013.

CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Avaliação do efeito do sistema de preparo em solos de diferentes texturas, na sua resistência mecânica e na produtividade da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 47, p. 83-98, 2003.

CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L.; Preparo de solo e o estado nutricional da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Scientia Forestalis** n. 66, p. 120-127, dez. 2004.

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

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

CONLIN, T. S. S.; DRIESSCHE, R. V. D. Short-term effects of soil compaction on growth of *Pinus contorta* seedlings. **Can. Journal of Forestry Research**, 26:727-739, 1996.

CORRÊA NETO, T. A.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M.G.; AMORIM, H. B.; JACCOUD, C. F. S. Atributos edafambientais e parâmetros dendrométricos de plantios de eucalipto em uma topossequência no campus da UFRRJ, Seropédica-RJ. **Ciência Florestal**, 17(1): 43-51, 2007.

COSTA, A. **Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: avaliação e geração de funções de pedotransferência.** 2012. 423f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2012.

COSTA, A. M.; CURI, N.; ARAÚJO, E. F.; MARQUES, J. J.; MENEZES, M. D. Avaliação do risco de anoxia para o cultivo do eucalipto no Rio Grande do Sul utilizando-se levantamento de solos. **Scientia Forestalis**. 2009; 37(84): 367-375.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS/UFV. p. 92-132. 2007

DEDECEK, R. A.; CURCIO, G. R.; RACHWAL, M. F. G.; SIMON, A. A.; Efeitos de sistemas de preparo do solo na erosão e na produtividade da acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 205-215, jul-set, 2007.

DEDECEK, R. A.; MENEGOL, O.; BELLOTE, A. F. J. Avaliação da compactação do solo em plantios de *Pinus taeda*, com diferentes sistemas de preparo do solo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 40, 2000, p. 5-21.

DOLDAN, M. E. Q. Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 20, n. 1 e 2, p. 54-55. 1990.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**. Special Publication Number 35, p. 1-20, 1994.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 225-232, Mar. 2009.

DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHERI, H. R.; **Produção e rentabilidade do eucalipto em empresas florestais**. Colombo: Embrapa, 2002. 4p.

DOURADO-NETO, D. et al. **Soil water retention curve**. version 3. Piracicaba, 2001.

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

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Luis Henrique Roessler - FEPAM 2012. Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura no RS. Disponível em http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/zoneam_silvic.asp. Acesso em 25.06.2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q., (Ed.) **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-28.

FERREIRA, M. M. **Física do solo**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 63 p.

FILHO, E. P.; SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2006. Disponível em: <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc129.pdf>. Acesso em 25/12/2012.

FINGER, C. A. G.; SCHUMACHER, M. V.; SCHNEIDER, P. R.; HOPPE, J. M.; Influência da camada de impedimento no solo sobre o crescimento de *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 137-145, 1996.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de Biometria Florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1992. 269p.

FINGER, C. A. G. **Ein Beitrag zur Estragskunde von *Eucalyptus grandis* und *Eucalyptus saligna* in Suedbrasilien**. 1991.137p. Tese de doutorado. Universitaet fuier Bodenkultur, Wien. 1991.

FONSECA, S. M. et al. **Cultura do Eucalipto em áreas montanhosas**. Viçosa: SIF, 2007. 43 p.

FONSECA, F.; FIGUEIREDO, T.; MARTINS, A. Survival and early growth of mixed forest stands installed in a Mediterranean Region: Effects of site preparation intensity. **Forest Ecology and Management**. 262. 1905–1912. 2011.

FORTES, A. B. **Geografia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Globo, 1959. 393p.

FREIRE, R. D. A.; ROCHA, W. W.; RAMOS, H. F.; BORGES, D. F. **Avaliação de Mudanças de Eucalipto sob diferentes Graus de Compactação e Adubações Fosfatadas**. Em: XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2012, Lages. Conservação do Solo e da Água no Brasil: preceitos e ações no ensino, na pesquisa e na extensão, v. XIX, 2012.

GAMMA Design Software GS+ Geostatistics for the Enviromental Sciences, version 9.0. Gamma Design Software, MI, USA, 1998.

GAVA L. J. Avaliação da Qualidade do Preparo do Solo em Áreas de Eucalipto Plantado no Sistema de Cultivo Mínimo do Solo. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n. 47, p. 55-68, jul.dez 2003.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; COSTA, L. M.; NEVES, J. C. L.; Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 5, p. 635-646, 2003.

GENT Jr, J. A. et al. Impact of site preparation on physical properties of Piedmont Forest. In: GOLLEY, F. B. **Tropical rain forest ecosystems: structure and function**. Amsterdam: Elsevier, 1983.392p.

GOMES, F. P., GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETT, V.; FESSEL, V. A. G. & GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M. & BENEDETT, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEFFAPESP, 2000. p.219-267.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; WICHERT, M. C. P.; GAVA, J. L.; Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498p.

GONZAGA, J. V. **Qualidade da madeira e da celulose Kraft de treze espécies de Eucalyptus**. 1983. 119p. Dissertação (Mestrado em Silvicultura) - Universidade Federal de Viçosa, 1983.

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. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, 2006.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; GELAIN, N. S.; OLIVEIRA, A. E.; UHDE, L. T. Identificação de camadas com diferentes estados de compactação pela análise fatorial da resistência do solo à penetração. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 8., 2010, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: CCR, 2010.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. - 2012. 152 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1-10. 2013

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, v. 16, p. 105-120, 1990.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Academic Press in San Diego. Harcourt Brace & Company, 1998. 771p.

HUNTER, I., Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**. 144, 189–200. 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Determinação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:11-18, 2001.

JONG VAN LIER, Q. (Org.) . **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v. 1. 298 p.

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, 2010.

KAISER, D. R.; REINERT, D. R.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:845-855, 2009.

KIEHL, J. E. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ed. Ceres, 1985. 492 p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 2. ed. 240p.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Ciências Agroveterinárias**, v. 5, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.

KIKUTI, P., NAMIKAWA, I.S. Estudo da interação clone x níveis da adubação em *Eucalyptus saligna*. **O papel**, n. 3, p. 37-44, 1990.

KREJCI, L. C.; MARTINS, L. G.; LOURENÇO, P. Y. Desenvolvimento do sistema radicular de *Eucalyptus* spp. sob diferentes condições de solo. **Copener Florestal**, 1986.

LAL, R. The role of physical properties in maintaining productivity of soils in the tropics. In: LAL, R.; GREENLAND, D. J. (Ed.). **Soil physical properties and crop production in the tropics**. Chichester: J. Wiley & Sons, 1979.

LAMANDE, M.; HALLAIRE, V.; CURMI, P.; PERES, G.; CLUZEAU, D. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. **Catena**, v. 54, p. 637-649, 2003.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:415-422, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E. & TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, 97:1210-1215, 2005.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2002.

LEITE, F. P. **Relações nutricionais e alterações edáficas de solos da região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais, pelo cultivo de eucalipto**. 2001. 66p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; NARIMATSU, K. C. P.; SILVA, M. G.; QUEIROZ, H. A. Atributos físico-químicos de um latossolo vermelho do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 163-173, 2010.

LUCIANO R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 36. n. 6 Viçosa Nov./Dec. 2012

MADEIRA, M. V.; FABIÃO, A.; PEREIRA, J. S.; ARAÚJO, M. C.; RIBEIRO, C. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. **Forest Ecology and Management**. 171, 75–85. 2002.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MALINOVSKI, J. R. Compactação dos solos usados para fins florestais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1996, Águas de Lindóia. **Resumos expandidos...** Águas de Lindóia: 1996. CD-Rom.

MANLY, B. F. J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. San Diego, Academic Press, 1995. 889p

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R. & ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plants species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 135, n. 1, p. 31-41, 1991.

MERCANTE, E. et al. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

MELLO, S. L. M. **Características do sistema radicular de povoamentos de eucaliptos propagados por semente e estacas**. Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais. ESALQ, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1997.

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, Gramado, 2007, **Resumos...** Gramado: SBCS, 2007. CD-ROM

MONIZ, A. C. **Elementos de pedologia**. USP, Polígono, São Paulo, 1972.

MORALES, C. A. S. **Relação entre atributos do solo com a produtividade de *Pinus taeda***. 2007. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade para o Desenvolvimento do Estado de Santa Catarina, Lages, 2007.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961.42p.

MORRIS, L. A.; LUDOVICI, K. H.; TORREANO, S. J.; CARTER, E. A., LINCOLN, M. C.; WILL, R. E. An approach for using general soil physical condition-root growth relationships to predict seeding growth response to site preparation tillage in loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 227, n. 1-2, p. 169-177. 2006.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

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

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristic of compacted soils. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 420-424, 1985.

ORELLANA, J. A.; PILATTI, M. A.; GRENON, D. A. Soil quality: An approach to physical state assessment. *J. Sust. Agric.*, 9:91-108, 1997.

ORWA, C.; MUTUA, A.; KINDT, R.; JAMNADASS, R.; ANTHONY, S. **Agroforestoree**. 2009. (<http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>)

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. **Revista Agropecuária Catarinense**, 9:50-52, 1996.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. EMBRAPA-CNPQ - **Documentos**, nº 38. Colombo, 2000. 113p.

PEREIRA, F. S. et al. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 211-217, 2010.

PETEAM, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1515-1526, 2010

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2002. 355p.

POYTON, R. J. Research the silviculture of *Eucalyptus grandis (saligna)* in the northern transvaal. **South African Forestry Journal**, v. 55, n. 1, p. 10-20, 1965.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 129-138, jan.-mar., 2013

PREVEDELLO, J. **Preparo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em Argissolo.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. 81 f. : il.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba: UFPR, 1996. 446 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação.** São Paulo: Ceres, 1991. 343p.

RALSTON, C. W. Recognition and mapping of site types for afforestation. In: FAO WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FOREST AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE, Canberra, 1967. **Proceedings.** Canberra, 1967. v. 1, p. 172-87.

REICHARDT, R.; TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri, São Paulo. Manole, 2004.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, Julho/Dezembro de 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1930-1935, 2006.

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. (Orgs.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, 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.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1547-1560, 2009.

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.

RICCI, M. S. F. A Importância da Matéria Orgânica para o Cafeeiro. **Revista Campo e Negócios**. Julho/2006.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina**, 26:321-344, 2005.

RODIGHERI, H. R.; PINTO, A. F.; Desempenho de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. citriodora*, com e sem preparo de solos em pastagem degradada, em Santana do Itararé - PR. **Circular Técnica N° 57**. Colombo, PR. 2001.

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

SAMPIETRO, J. A. **Propriedades mecânicas e trafegabilidade de solos em plantios florestais**. 2013. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SANCHEZ, P. A. Suelos dei trópico: características y manejo. San José, Inst. Interam. Coop. Agric. 1981. 633p.

SANDS, R.; MULLIGAN, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, n. 30, p. 91-111, 1990.

SANTOS, L. D. T. et al. Exsudação radicular do glyphosate por *Brachiaria decumbens* e seus efeitos em plantas de eucalipto e na respiração microbiana do solo. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 143- 152, jan. 2005.

SASAKI, C. M. Força de tração e desempenho operacional de hastes subsoladoras em solos com diferentes texturas e umidade. 2000. 53 p. **Dissertação** (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 2000.

SASAKI, C. M.; BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M. Configurações básicas de subsoladores florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p.393-407.

SASAKI, C. M.; GONÇALVES, J. L. M.; Desempenho operacional de um subsolador em função da estrutura, do teor de argila e de água em três latossolos. **Scientia Forestalis** n. 69, p. 115-124, dez. 2005.

SHARMA, J. **Development of Biotechnological Tools for the Genetic Improvement of selected elite clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm.** Dissertatinon. Thapar Institute of Engineering and Technology. 2006.

SILVA, F. de A. S. ASSISTAT Versão 7.7 beta (2014) - DEAG-CTRN-UFCG
<http://www.assistat.com> - Atualiz.06/01/2014.

SILVA, S. R. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto.** 2005. 97p. Doutorado (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005.

SILVA, W. et al. Absorção de nutrientes por mudas de duas espécies de eucalipto em resposta a diferentes teores de água no solo e competição com plantas de *Brachiaria brizantha*. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 1, p. 147-159, jan. 2000.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores de qualidade física do solo. In: QUIRINJ DE JONG VAN LIER. (Org.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 241-281.

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

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Avaliação da compactação de solos florestais. In: José Leonardo de Moraes Gonçalves; José Luiz Stape. (Org.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002, v. , p. 351-372.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; TORMENA, C. A. IMHOFF, S. C. Least limiting water range of soils. **Encyclopedia of Soil Science**, 1:1026-1029, 2006.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J.; Neves Júnior, A. F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2009, v. 6, p. 1-30.

SOUZA, A. J.; ARAÚJO, E. F.; SILVA, A. P. Preparo de um Solo Coeso para Cultura do Eucalipto no Extremo Sul da Bahia. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais**. Londrina, 2001.

SOUZA, A. J. Preparo de solos coesos para cultura do eucalipto no extremo sul da Bahia. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 8, p. 297-311.

SOUZA, M. J. H; RIBEIRO, A; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade do eucalipto em diferentes idades, em Guanhães, Minas Gerais. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. v.10, n. 3, Campina Grande July/Sept. 2006.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHUMACHER, M. V. **Naehrstoffkreislauf in verschiedenen Bestaenden von *Eucalyptus saligna* (Smith), *Eucalyptus dunnii* (Maiden) und *Eucalyptus globulus* (Labillardière) in Rio Grande do Sul, Brasilien**. 1995. 167p. Tese (Doutorado) - Universitaet fuer Bodenkultur, Viena, Áustria.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**. 259. 1684–1694. 2010

STAPE, J. L.; ALVEZ, J. M.; TAKAHASHI, E. N.; FRANCISCATE, W.; JACOB, W. S. Assessing nutritional and climate limitations to the productivity of eucalyptus plantations at larger spatial and temporal scales using a simple paired-plot design coupled to traditional inventory network. In: BORRALHO, N., et al. (2004). *Eucalyptus in a Changing World*. IUFRO Conf., Aveiro 11-15, October, 2004.

STAPE, J. L.; ANDRADE, S.; GOMES, A. N.; KREJCI, L. C.; RIBEIRO, J. A. Definição de métodos de preparo do solo para silvicultura em solos coesos do litoral norte da Bahia. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498p.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantation in northeastern Brazil**. 2002. 225f. Tese (Pós Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade do Colorado, Fort Collins, 2002.

STAPE, J. L., BINKLEY, D., RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**. 255, 920–930. 2008.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.207-212, 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P. Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 18:533-539,1994.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology** - The physics of irrigated and non irrigated soils. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1972. 532p.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations of coarse textured materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1996.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith para a depressão central e serra do sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**; 16(1): 27-43, 2006.

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

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 333-39, 1996.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:211-219, 2007.

VAN, GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44: 892-898, 1980.

VANCE, E. D. Agricultural site productivity: principles derived from long-term experiments and their implications for intensively managed forests. **Forest Ecology and Management**. 138. 369-396. 2000.

VOSE, J. M.; SWANK, W. T. Effect of long-term drought on the hydrology and growth of a white pine plantation in the southern Appalachians. **Forest Ecology and Management**, n. 64, p. 25-39, 1994.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; FONSECA, V. S.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Três métodos de cálculo do dris para avaliar o potencial de resposta à adubação de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:661-666, 1998.

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

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, 2006

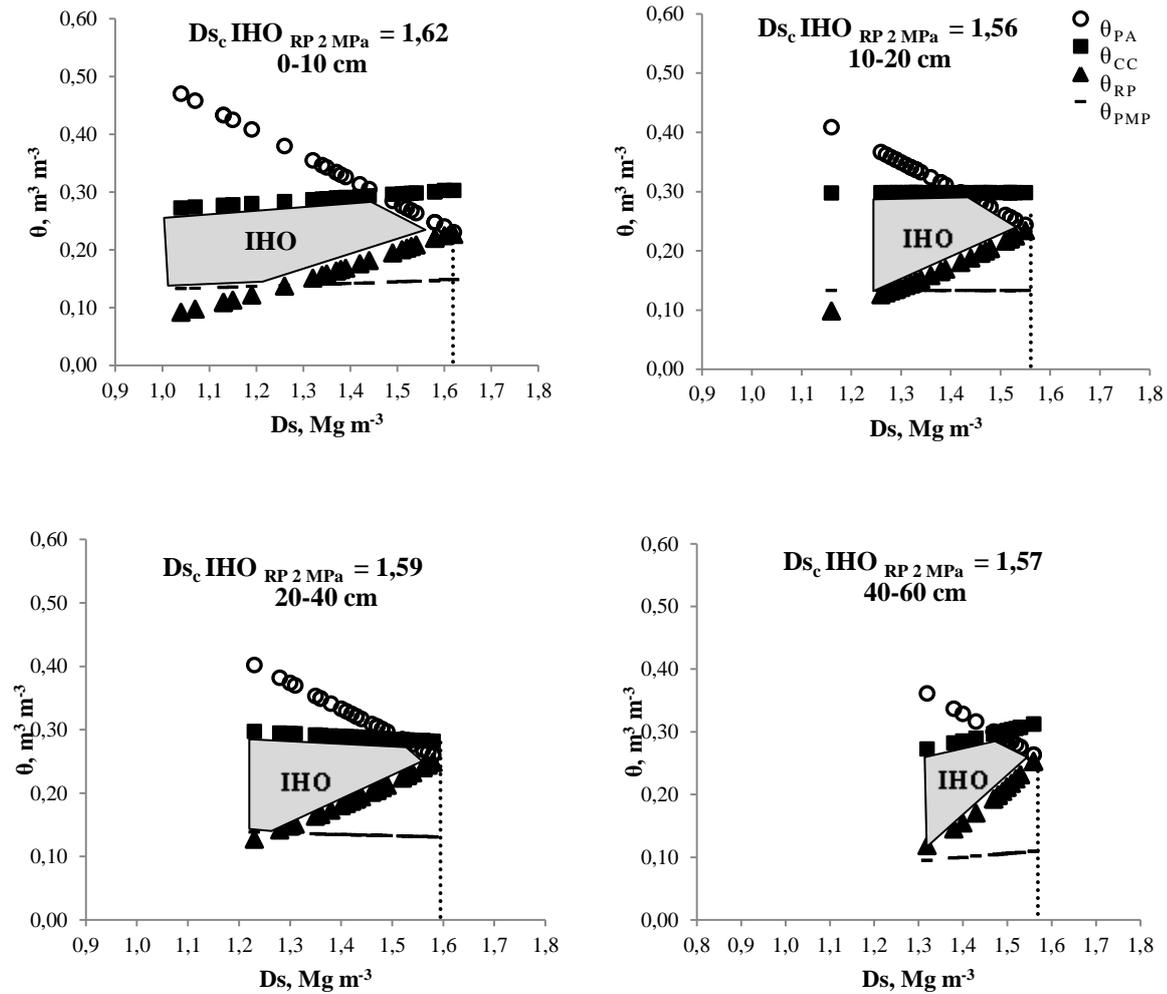
ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, 38:947-958, 2000.

APÊNDICES

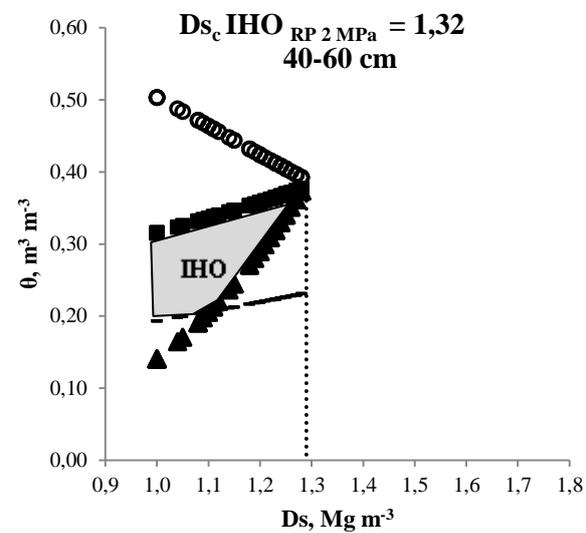
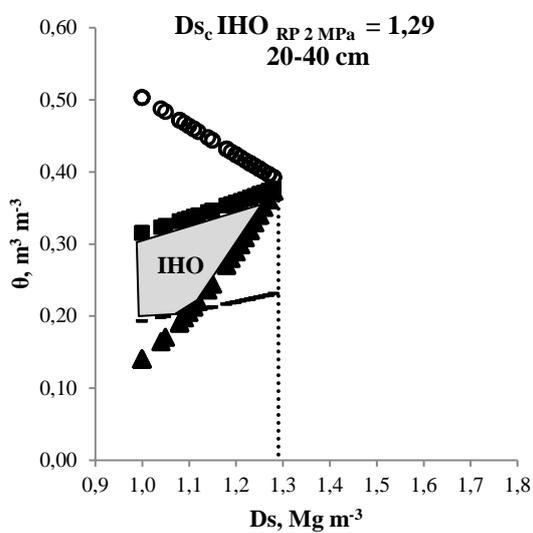
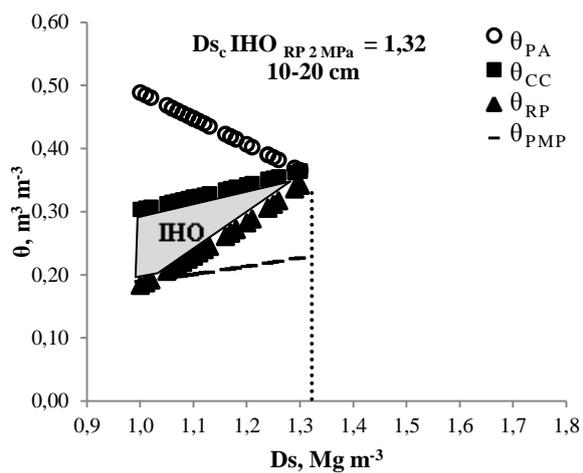
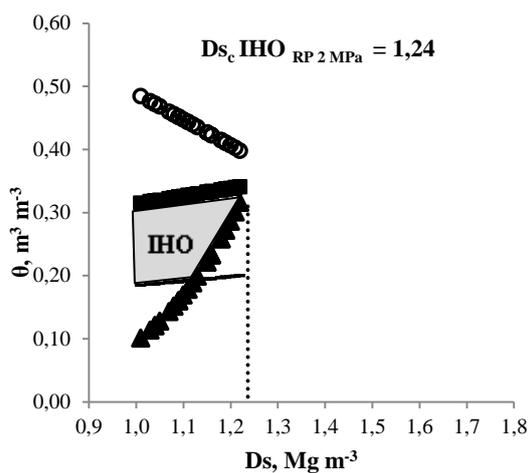
APÊNDICE A – Análise química do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe), Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd) e do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh) antes da implantação do experimento.

Profundidade (cm)	pH _{H2O}	P (mg/dm ³)	K (mg/dm ³)	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC		M.O	SB %	m	Ca/Mg	Zn	Cu	S (mg/dm ³)	B
								Efetiva	ph7								
Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico - SXe																	
0-10	4,6	5,9	143,4	3,3	1,4	0,6	5,7	5,8	10,9	2,1	47,6	10,9	2,3	2,1	1,6	14,9	0,4
10-20	4,8	3,3	92,6	3,0	1,1	1,1	6,1	5,4	10,4	1,9	42,3	19,7	2,8	1,1	1,5	13,1	0,3
20-40	4,8	1,9	75,4	3,5	1,1	1,5	6,2	6,4	11,1	1,8	43,0	24,5	3,3	0,6	1,2	12,6	0,4
40-60	4,8	1,3	68,6	2,5	1,2	1,0	7,7	4,9	11,6	1,7	34,0	18,0	2,1	0,4	1,1	10,8	0,3
Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVd																	
0-10	4,5	6,4	186,5	2,8	2,0	2,2	14,9	7,5	20,2	2,9	28,7	30,6	1,4	1,0	1,5	22,9	0,4
10-20	4,3	4,4	148,5	2,0	1,6	3,2	21,6	7,2	25,6	2,4	18,6	45,9	1,3	0,6	1,5	21,1	0,4
20-40	4,1	2,1	105,0	1,2	1,0	4,7	28,5	7,2	31,0	1,5	8,3	65,5	1,3	0,2	1,4	19,9	0,4
40-60	4,0	2,1	64,5	0,8	0,7	4,9	30,8	6,5	32,5	1,0	5,1	75,2	1,2	0,3	1,4	15,7	0,4
Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico - RReh																	
0-10	5,1	38,8	151,4	5,3	0,9	0,1	4,6	6,8	11,2	2,8	58,5	2,1	5,7	2,9	0,6	13,7	0,3
10-20	5,2	31,8	105,7	5,5	0,8	0,1	4,7	6,8	11,3	2,4	57,1	2,7	6,4	1,9	0,5	13,4	0,3
20-40	4,9	17,5	78,3	5,7	0,8	0,3	6,5	7,0	13,2	2,0	50,0	5,8	7,5	1,2	0,4	10,4	0,3
40-60	5,1	12,3	91,4	5,3	0,8	0,3	5,6	6,6	11,9	1,7	51,3	5,9	6,7	1,2	0,5	11,9	0,3

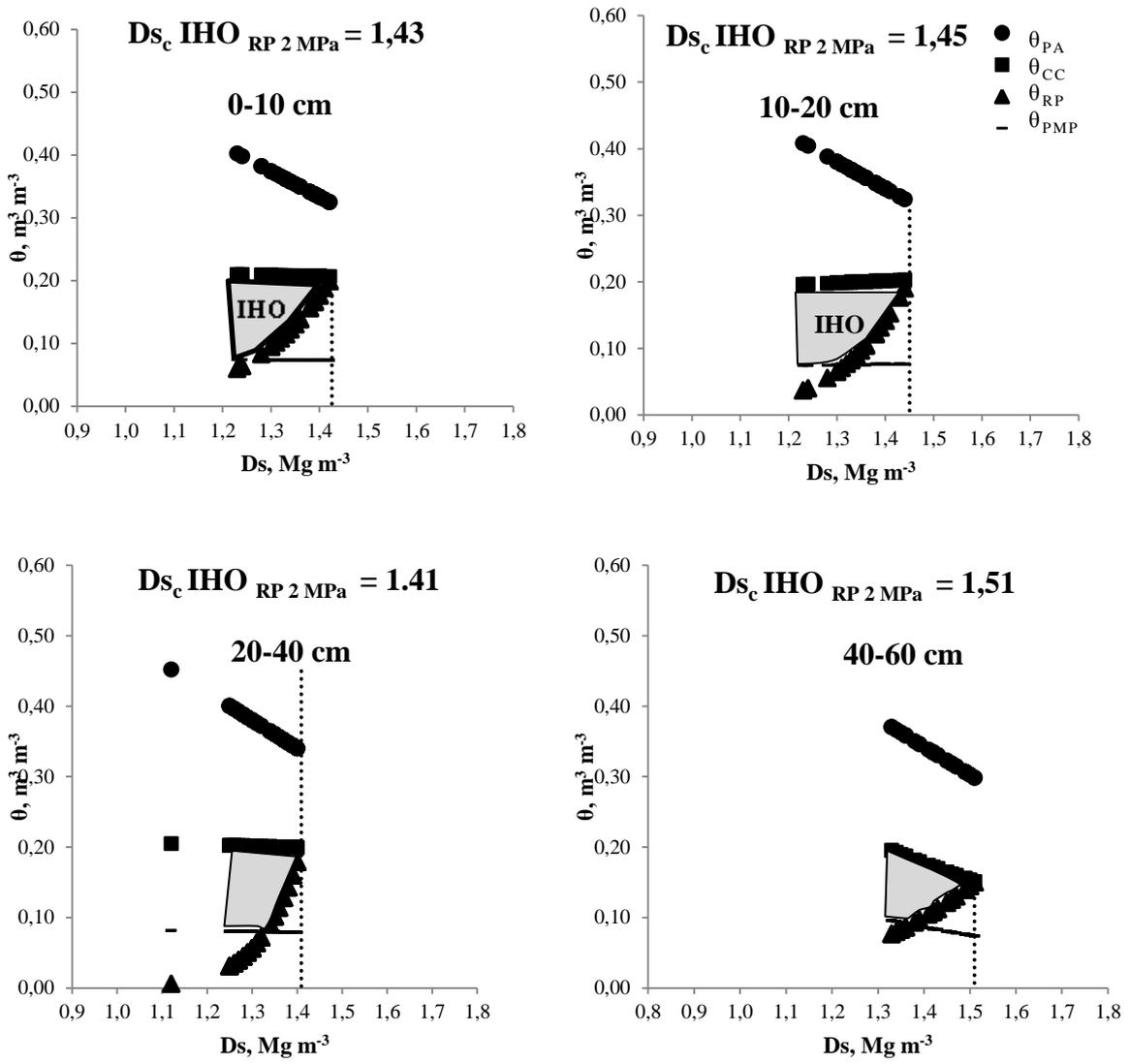
APÊNDICE B – Variação da umidade volumétrica (θ) com a densidade do solo (D_s) nos limites críticos de porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as quatro camadas avaliadas do Planossolo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



APÊNDICE C – 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 Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVD); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP 2 MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.



APÊNDICE D – 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 Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh); IHO: intervalo hídrico ótimo; $D_{s_c IHO_{RP2MPa}}$: densidade do solo crítica considerando RP crítica de 2 MPa.



APÊNDICE F – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXE).

Tratamento	Prof.	pH _H	P	K	A	C	M	H ⁺	CTC	M.	SB	m	Ca/	Z	C	S	B
			mg/dm ³		cmolc/dm ³						(%)		cmolc/dm ³				
S50	0-	4,8	6,5	158	0,	3,	1,	5,9	5,3	1,4	45,	7,7	2,1	2,5	1,	13,	0,
	10-	4,9	6,9	141	0,	3,	1,	5,7	5,5	1,4	46,	10,	2,3	1,5	1,	15,	0,
	20-	4,8	3,7	128	1,	2,	1,	6,2	4,8	1,3	38,	20,	2,1	0,7	1,	13,	0,
	40-	4,7	3,5	92,	1,	1,	1,	6,2	4,6	1,5	32,	33,	1,8	0,5	1,	10,	0,
S50C	0-	4,7	10,	138	0,	6,	2,	6,9	9,8	2,1	53,	5,3	2,3	3,8	1,	17,	0,
	10-	4,7	17,	120	0,	3,	1,	6,4	5,6	1,5	44,	7,2	2,3	2,5	1,	14,	0,
	20-	4,7	5,0	74,	0,	3,	1,	5,8	5,4	1,5	45,	12,	3,1	0,9	1,	15,	0,
	40-	5,1	15,	57,	0,	2,	0,	7,0	4,1	1,2	32,	12,	2,7	0,6	1,	12,	0,
S70	0-	4,9	6,6	144	0,	2,	1,	6,2	4,9	1,3	41,	8,4	2,3	1,2	1,	21,	0,
	10-	4,9	6,4	122	0,	2,	1,	5,6	4,8	1,4	43,	10,	2,3	0,6	1,	17,	0,
	20-	5,0	3,7	102	1,	2,	1,	6,0	5,6	1,3	44,	17,	1,9	0,5	1,	13,	0,
	40-	4,9	3,7	97,	1,	2,	1,	5,8	4,9	1,5	38,	24,	1,7	0,3	1,	13,	0,

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

APÊNDICE G – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).

Tratamento	Prof.	pH _H	P	K	Al	C	M	H+	CTC	M.	SB	m	Ca/	Z	C	S	B
			mg/dm ³		cmolc/dm ³					(%)		cmolc/dm ³					
S50	0-	4,1	9,7	213,	3,8	2,	1,	21,	1,5	9,	19,	42,	1,7	0,	1,	44,0	0,4
	10-	4,0	1,2	92,0	5,0	1,	0,	32,	1,5	7,	6,3	70,	1,9	0,	1,	14,7	0,3
	20-	4,1	1,5	69,3	5,0	0,	0,	30,	1,2	6,	4,0	79,	1,8	0,	1,	13,3	0,4
	40-	4,0	1,0	49,3	4,4	0,	0,	32,	0,8	5,	3,2	80,	2,0	0,	1,	11,3	0,2
S50C	0-	4,5	7,7	193,	2,4	3,	1,	12,	2,6	8,	34,	27,	2,1	1,	1,	20,7	0,2
	10-	4,3	19,7	142,	2,8	2,	1,	20,	2,1	6,	17,	41,	2,4	1,	1,	15,7	0,2
	20-	4,0	1,7	93,3	5,0	1,	0,	27,	1,9	7,	7,1	70,	1,6	0,	1,	15,7	0,3
	40-	4,0	1,0	69,3	4,2	0,	0,	27,	1,9	5,	4,7	75,	1,7	0,	1,	16,1	0,3
S70	0-	4,1	4,0	180,	2,1	2,	1,	18,	2,1	6,	18,	32,	1,8	0,	1,	16,7	0,3
	10-	4,0	2,5	78,7	4,3	1,	0,	30,	1,3	6,	5,9	69,	2,1	0,	1,	21,0	0,3
	20-	4,0	12,8	70,7	3,3	1,	0,	32,	1,6	5,	5,6	50,	2,1	0,	1,	25,7	0,4
	40-	4,0	1,7	73,3	4,5	1,	0,	34,	1,8	6,	5,3	68,	1,8	0,	1,	26,3	0,3

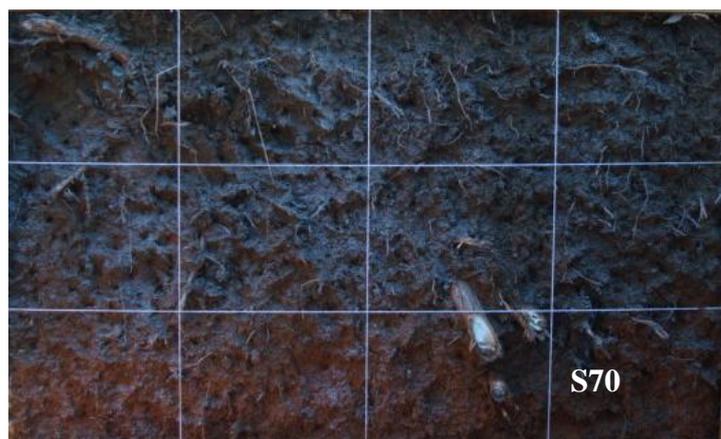
S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

APÊNDICE H – Análise química média das parcelas dos tratamentos de preparo de solo aplicados no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

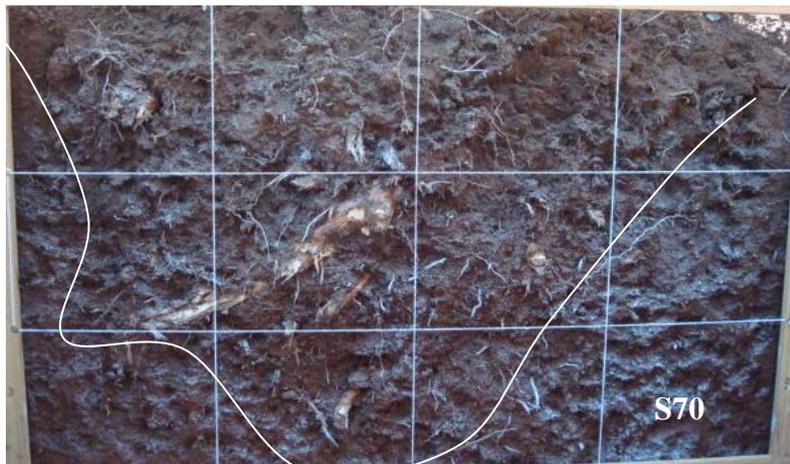
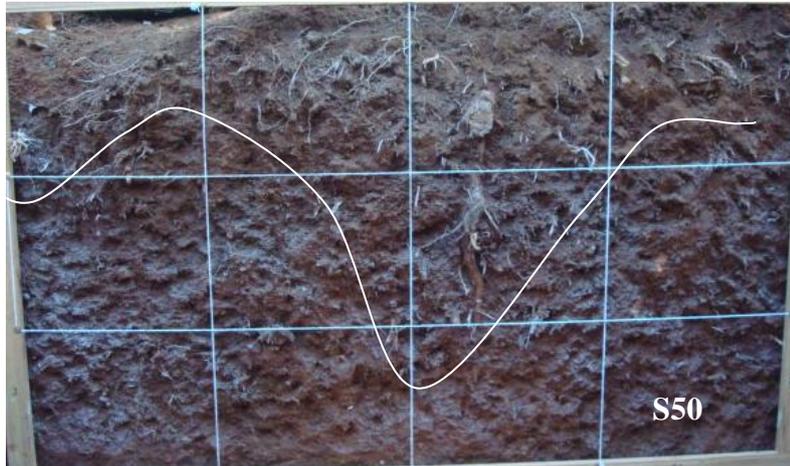
Número	Prof.	pH _H	P	K	A	C	M	H ⁺	CTC	M.	SB	m	Ca/	Z	C	S	B
			mg/dm ³		cmolc/dm ³					(%)	cmolc/dm ³						
S50	0-	5,1	16,	132	0,	4,	0,	5,6	5,9	1,5	50,	5,3	5,8	2,	0,	8,7	0,
	10-	4,7	57,	101	0,	5,	0,	5,9	6,4	1,8	50,	6,1	8,0	2,	0,	30,	0,
	20-	4,9	16,	98,	0,	4,	0,	5,9	5,9	1,9	48,	8,1	7,4	1,	0,	12,	0,
	40-	5,0	10,	78,	0,	4,	0,	5,4	5,6	1,6	49,	7,6	8,3	1,	0,	5,3	0,
S50C	0-	4,8	37,	185	0,	4,	1,	6,3	7,1	2,4	51,	4,2	3,6	4,	0,	13,	0,
	10-	4,9	36,	140	0,	5,	1,	6,8	6,8	1,9	48,	8,1	5,6	3,	0,	11,	0,
	20-	4,9	29,	132	0,	5,	0,	7,3	6,7	1,8	45,	8,6	5,4	2,	0,	12,	0,
	40-	4,9	13,	109	0,	4,	0,	6,4	6,4	1,8	47,	9,0	6,1	1,	0,	10,	0,
S70	0-	5,0	32,	208	0,	4,	1,	6,5	6,6	2,4	50,	3,1	5,0	3,	0,	9,0	0,
	10-	4,9	19,	157	0,	5,	0,	6,0	6,6	1,8	50,	5,8	6,3	1,	0,	8,5	0,
	20-	4,8	84,	106	0,	5,	0,	7,8	7,3	1,8	45,	8,3	6,3	1,	0,	11,	0,
	40-	4,8	8,7	124	0,	5,	0,	8,1	7,1	2,0	43,	11,	5,5	1,	0,	9,2	0,

S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão.

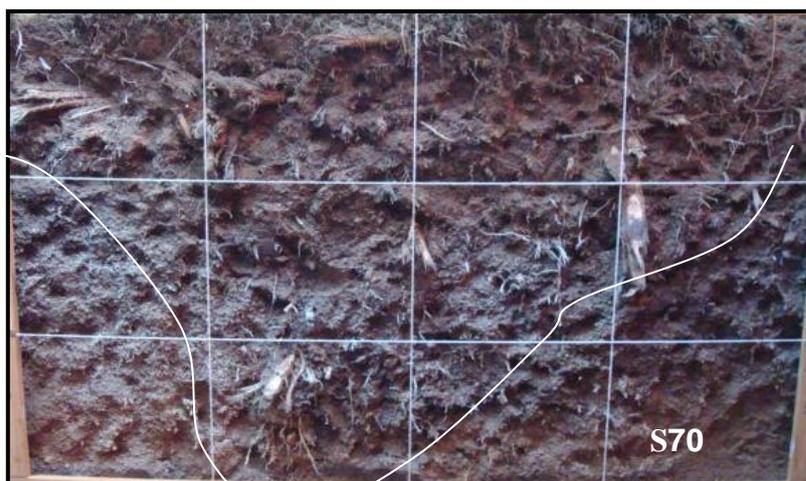
APÊNDICE I – Distribuição radicular do *Eucalyptus saligna* nos diferentes tratamentos (S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão) no Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico.



APÊNDICE J – Distribuição radicular do *Eucalyptus saligna* nos diferentes tratamentos (S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão) no Nitossolo Vermelho Distrófico típico.



APÊNDICE L – Distribuição radicular do *Eucalyptus saligna* nos diferentes tratamentos (S50= subsolagem a 50 cm mais enxada rotativa; S70= subsolagem a 70 cm mais enxada rotativa e S50C = subsolagem a 50 cm mais camalhão) no Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).



ANEXOS

ANEXO 1 – Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe)**A) DESCRIÇÃO GERAL**

DATA – 06/03/2014

CLASSIFICAÇÃO: Planossolo Háptico Eutrófico gleissólico (SXe)

LOCALIZAÇÃO – Perfil descrito em trincheira no Horto Santa Amália.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Rio Bonito: Arenito e siltito; Depósitos aluvionares: areia e cascalho.

DESCRITO E COLETADO POR – Alberto Vasconcellos Inda, Elvio Giasson e Paulo César do Nascimento

B) DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-10 cm, bruno-escuro (10 YR 3/3, úmido); franco argilosa; fraca pequena e média granular e fraca pequena a média blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.
- A 10-22 cm, bruno (10 YR 4/3, úmido); franco argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.
- E 22-32 cm, bruno (10 YR 4/3, úmido) com mosqueado bruno-avermelhado (2,5 YR 4/4, úmido); argilo siltosa; moderada pequena a grande blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.
- EB 32-44 cm, bruno-amarelado (10 YR 5/4, úmido) com mosqueado bruno-avermelhado (2,5 YR 4/4, úmido); argilo siltosa; moderada pequena e média blocos subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição abrupta e plana.
- Btg 44-60⁺ cm, bruno-escuro (10 YR 3/3, úmido) com mosqueado bruno-avermelhado (5 YR 4/4, úmido); muito argilosa; forte média prismática que se quebra em pequenos e médios blocos subangulares; muito firme, plástico e pegajoso.

Observações: Raízes comuns no Ap, poucas no A e E, e ausentes no EB e Btg.



Foto representativa do Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico (SXe).

Foto: Alberto Vasconcelos Inda

ANEXO 2 – Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd)**A) DESCRIÇÃO GERAL**

DATA –

06/03/2014

CLASSIFICAÇÃO: Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd)

LOCALIZAÇÃO – Perfil descrito em trincheira no Horto Guatambu II.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Acampamento Velho: Riolito e Tufo félsico.

DESCRITO E COLETADO POR – Alberto Vasconcellos Inda, Elvio Giasson e Paulo César do Nascimento

B) DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-12 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido); argila; moderada média a grande granular; pouco poroso; firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.
- A 12-30 cm, bruno-avermelhado-escuro (5 YR 3/4, úmido); argila; moderada média a grande blocos subangulares; poroso; firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- B1 30-60 cm, vermelho-escuro (2,5 YR 3/6, úmido); muito argilosa; moderada média a grande blocos subangulares; poroso; cerosidade moderada e comum; firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- B2 60-90/100 cm, vermelho-escuro (2,5 YR 3/6, úmido); muito argilosa; forte pequena a média blocos subangulares; poroso; cerosidade forte e comum; firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e ondulada.
- BC1 90/100-115 cm, vermelho-amarelado (5 YR 4/6, úmido); argila; maciça quebrando em moderada média a grande blocos angulares; pouco poroso; firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e ondulada.
- BC2 115-125⁺ cm, bruno (7,5 YR 5/2, úmido), mosqueado vermelho-amarelado (5 YR 5/6, úmido); argila; maciça quebrando em moderada média a grande blocos angulares; pouco poroso; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Observações: Raízes comuns no Ap e A, poucas no B1 e B2 e ausentes no BC1 e BC2.

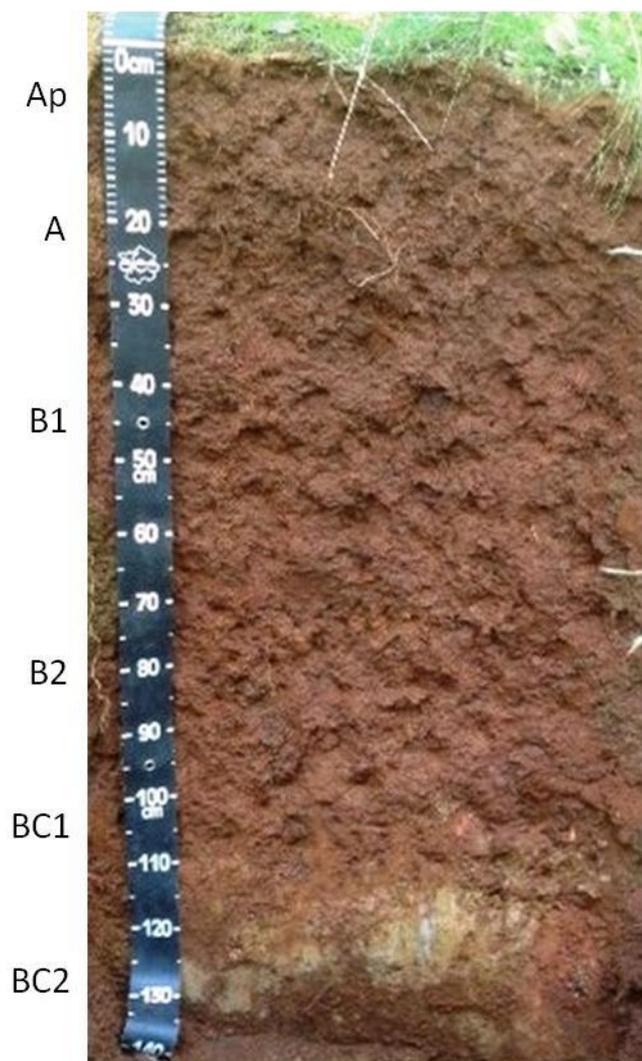


Foto representativa do Nitossolo Vermelho Distrófico típico (NVd).

Foto: Alberto Vasconcellos Inda

ANEXO 3 – Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).**A) DESCRIÇÃO GERAL**

DATA –

07/03/2014

CLASSIFICAÇÃO: Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh)

LOCALIZAÇÃO – Perfil descrito em trincheira no Horto Vila Palma II.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Monzogranito Santa Rita: Granidiorito e monzogranito.

DESCRITO E COLETADO POR – Alberto Vasconcellos Inda, Elvio Giasson e Paulo César do Nascimento

B) DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-15 cm, bruno muito escuro (10 YR 2/2, úmido); franco arenosa; fraca pequena a média blocos subangulares; friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- A 15-65 cm, preto (10 YR 2/1, úmido); franco arenosa; fraca pequena a média blocos subangulares; friável, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- CA 65/87 cm, bruno-acinzentado muito escuro (10 YR 3/2, úmido); areia franca; fraca pequena a média blocos subangulares; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição gradual e plana.
- C 87-120⁺ cm, bruno-escuro (10 YR 3/3); areia franca; fraca pequena blocos subangulares; muito friável, não plástica e não pegajosa.

Observações: Raízes abundantes no Ap, A e CA, e comuns no C.

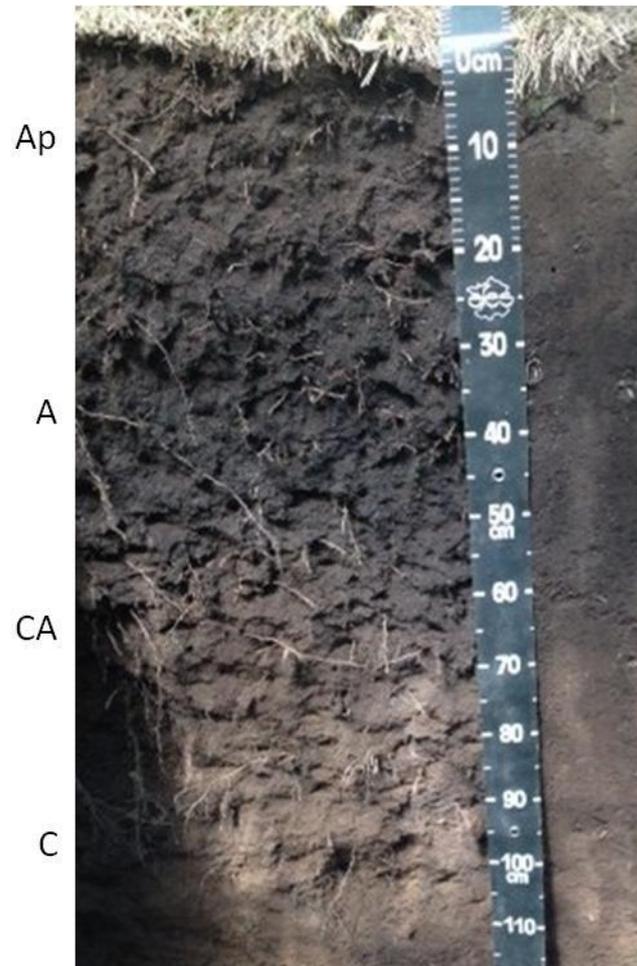


Foto representativa do Neossolo Regolítico Eutroúmbrico típico (RReh).

Foto: Alberto Vasconcellos Inda

