

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

**ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM
CAMBISSOLO HÚMICO EM POVOAMENTOS DE
Pinus taeda L. COM DIFERENTES ROTAÇÕES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Simone Filipini Abrão

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM CAMBISSOLO
HÚMICO EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. COM
DIFERENTES ROTAÇÕES**

Simone Filipini Abrão

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado 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
Mestre em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. PhD. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2011

A161a Abrão, Simone Filipini
 Alterações físicas e químicas de um cambissolo húmico em povoamentos de
 Pinus taeda L. com diferentes rotações / por Simone Filipini Abrão. – 2011.
 95 f. ; il. ; 30 cm

 Orientador: Dalvan José Reinert
 Coorientador: José Miguel Reichert
 Coorientador: Frederico Dimas Fleig
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
 Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2011

 1. Engenharia florestal 2. Florestamento 3. Qualidade do solo 4. Propriedades
 do solo I. Reinert, Dalvan José II. Reichert, José Miguel III. Fleig, Frederico

Dimas IV. Título.

 CDU 631.4

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

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

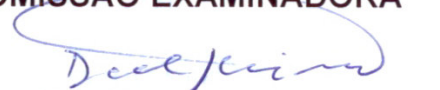
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM CAMBISSOLO
HÚMICO EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.
COM DIFERENTES ROTAÇÕES

elaborada por
Simone Filipini Abrão

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal.

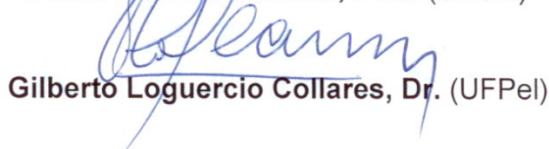
COMISSÃO EXAMINADORA



Dalvan José Reinert, PhD.
(Presidente/Orientador)



Flávio Luiz Foletto Eltz, PhD. (UFSM)



Gilberto Loguercio Collares, Dr. (UFPel)

Santa Maria, 03 de março de 2011

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao meu orientador, Dalvan José Reinert, pela confiança e amizade.

Aos meus co-orientadores, Frederico Dimas Fleig, pela ajuda e ensinamentos, e José Miguel Reichert, pelos incentivos à carreira docente.

À empresa Cambará S.A., representada pelo engenheiro florestal Vandir Francisco Zancan, por todo o apoio e auxílio prestados na realização do presente trabalho.

Ao Leonir Barichello, pelo incentivo e apoio ao projeto, ao Evandro Viero, por todo o empenho e ajuda nos trabalhos a campo, bem como ao Nejandro Passos, por sua inteira dedicação e amizade.

Um agradecimento muito especial a: André de Oliveira, Charlotte Wink, Claudine Ohana B. Consensa, Luiz Francisco A. Finamor, Miriam Fernanda Rodrigues, Paulo Ivonir Gubiani e Suzana F. da Rosa, que merecem todo o meu carinho e minha admiração pelo comprometimento e apoio para a concretização do presente estudo.

Aos membros da comissão examinadora, pela disponibilidade e contribuição. Aos colegas da Física e do Departamento de Solos, pela convivência, amizade e pelos eventuais auxílios diários: Alan, Alencar, Bruno, Cedinara, Cláudia Alessandra, Davi Alexandre, Débora, Eduardo, Elói, Eracilda, Flávio, Jean Alberto, Juliana, Júlio César, Leandro; Lenise Raquel, Luis Eugênio, Marcelo, Mayra, Nadia, Neiva, Tiago Ivan e Valmi.

Aos amigos e colegas do PPGEF, pelo convívio, aprendizagem e momentos de descontração.

À Cerlene Machado (Tita), pela ajuda e orientação.

A meus pais, Jorge Victor R. Abrão e Bernadete F. Abrão, meus maiores educadores e incentivadores e aos meus irmãos, Raquel e Bruno.

Ao Ângelo Augusto Ebling, pela paciência e companheirismo.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Meu sincero e eterno agradecimento!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM CAMBISSOLO HÚMICO EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. COM DIFERENTES ROTAÇÕES

AUTORA: SIMONE FILIPINI ABRÃO
ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT
Local e Data da Defesa: Santa Maria, 03 de Março de 2011.

Partindo-se do pressuposto de que mudanças no uso do solo podem proporcionar alterações nas propriedades físicas e químicas, influenciando a sua qualidade, o objetivo do estudo foi verificar se a introdução da espécie *Pinus taeda* L., em solo sob campo natural, pode degradar física e quimicamente a qualidade do Cambissolo Húmico, em diferentes rotações. O estudo foi conduzido na região dos Campos de Cima da Serra – RS, Brasil, onde ocorrem grandes áreas florestadas com pínus. Para isso, foram escolhidas duas áreas de estudo, uma em primeira (RT1) e a outra em segunda rotação (RT2), com 13 anos de idade. Para cada povoamento, foi avaliada conjuntamente uma área de campo natural adjacente (testemunha). Em cada área, foram abertas 5 trincheiras e coletadas amostras de solo nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. As alterações nas propriedades físicas foram analisadas através das seguintes determinações: granulometria, densidade de partículas, densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade do solo ao ar, e distribuição do tamanho de agregados estáveis em água. As determinações químicas realizadas foram: cálcio, magnésio, fósforo, potássio, pH em água, pH_{SMP}, alumínio trocável, nitrogênio total e carbono orgânico total. Na RT1 houve alteração na macro e microporosidade, influenciando o comportamento da condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar a 6 e 10kPa. Na RT2, o efeito do pínus na macro, microporosidade e, conseqüentemente, na condutividade hidráulica, ocorreu somente na camada superficial (0,0 a 0,05 m), devido ao manejo adotado na área. Considerando as duas áreas de estudo, houve redução da estabilidade dos agregados na camada de 0,05 a 0,20 m. No entanto, na mesma camada, a RT2 apresentou elevação na estabilidade de agregados de classes de tamanho menores, refletindo o manejo adotado. As propriedades químicas foram alteradas principalmente nas camadas superficiais, apresentando reduções das bases trocáveis (Ca e Mg) e elevações dos teores de P trocável. O pínus também promoveu o aumento nos teores de Al e a diminuição do pH, elevando a acidez do solo e reduzindo, dessa forma, a qualidade do Cambissolo Húmico. Na RT1, os teores de C e N foram reduzidos na camada superficial, porém, na RT2, os níveis de C e N apresentaram-se similares ao campo natural, inferindo, em longo prazo, a capacidade de restauração dos níveis de C no solo.

Palavras-chave: florestamento, qualidade do solo, propriedades do solo.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Forestry
Federal University of Santa Maria

PHYSICAL AND CHEMICAL CHANGES OF A Haplumbrept IN STANDS OF *Pinus taeda* L. WITH DIFFERENT ROTATIONS

AUTHOR: SIMONE FILIPINI ABRÃO

ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT

PLACE AND DATE OF THE DEFENSE: SANTA MARIA, MARCH 03, 2011.

Starting from the assumption that changes in land use can provide changes in physical and chemical properties, influencing its quality, the study aimed to verify whether the introduction of *Pinus taeda* L., on soil under native grassland conditions, can degrade physical and chemical quality of Haplumbrept soil in different rotations. The study was conducted in the region of Campos de Cima da Serra - RS, Brazil, where there are large forested areas with pine trees. To this, were selected two study areas, one in the first (RT1) and another in the second rotation (RT2), with 13 years of age. For each stand, was assessed a combined area of grassland adjacent (control). In each area, five trenches were opened and collected soil samples at depths from 0.0 to 0.05, from 0.05 to 0.20, 0.20 to 0.40 and 0.40-0.60 m. Changes in physical properties were analyzed using the following parameters: particle size, particle density, bulk density, porosity, macro and micro porosity, hydraulic conductivity of saturated soil, soil air permeability and size distribution of water stable aggregates. The chemical determinations were: calcium, magnesium, phosphorus, potassium, pH, pH_{SMP} , exchangeable aluminum, total nitrogen and total organic carbon. At RT1 was a change in the macro and microporosity, influencing the behavior of hydraulic conductivity and air permeability at 6 and 10 kPa. At RT2, the effect of pine in the macro, microporosity and hence hydraulic conductivity, occurred only in the surface layer (0.0 to 0.05 m) due to the management adopted in the area. Considering the two study areas, there was a reduction of the aggregate stability in the layer from 0.05 to 0.20 m. However, in the same layer, the RT2 presented an increase in stability of aggregates of smaller size classes, reflecting the management type. The chemical properties were altered mainly in the surface layers, with reductions of exchangeable bases (Ca and Mg) and elevation of P saturation. The pine has also promoted increased levels of Al and decrease in pH, increasing soil acidity and reducing thereby the quality of Haplumbrept soil. In RT1, the content of C and N were reduced in the surface layer, but in RT2, levels of C and N were similar to natural field, inferring in the long run, the ability to restore the levels of C in soil.

Keywords: afforestation, soil quality, soil properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Cambará do Sul, RS	32
Figura 2 - Área de campo natural e, ao fundo, povoamento de <i>Pinus taeda</i> na Fazenda Olaria, Cambará do Sul, RS, Brasil	35
Figura 3 - Área de campo natural e, ao fundo, povoamento de <i>Pinus taeda</i> na Fazenda Varzinha, Cambará do Sul, RS, Brasil	36
Figura 4 - Croqui de localização das áreas de estudo na Fazenda Olaria (29°06'S; 50°11'W) em Cambará do Sul, RS, Brasil	38
Figura 5 - Croqui de localização das áreas de estudo na Fazenda Varzinha (28°53'S; 50°07'W) em Cambará do Sul, RS, Brasil	39
Figura 6 - Coleta de amostras de solo com a estrutura preservada	39
Figura 7 - Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura de solo preservada	41
Figura 8 - Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado	42
Figura 9 - Valores médios de agregados estáveis em água em diferentes classes de agregados do Cambissolo Húmico, considerando a área de primeira rotação (RT1) e campo natural adjacente (CN1) nas diferentes camadas, Cambará do Sul, RS, Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada classe, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro	62
Figura 10 - Valores médios de agregados estáveis em água em diferentes classes de agregados do Cambissolo Húmico, considerando a área de segunda rotação (RT2) e campo natural adjacente (CN2) nas diferentes camadas, Cambará do Sul, RS, Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada classe, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro	65
Figura 11 - Valores médios do diâmetro médio geométrico (DMG) em diferentes camadas do Cambissolo Húmico, considerando a área de primeira e segunda rotação (RT1 e RT2) e seus respectivos campos naturais adjacentes (CN1 e CN2), Cambará do Sul, RS,	

Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada camada, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dendrométricos dos povoamentos de <i>P. taeda</i> aos 13 anos de idade em Cambará do Sul, RS, Brasil	37
Tabela 2 - Valores médios de areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila do Cambissolo Húmico e, seus respectivos grupos texturais para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	46
Tabela 3 - Densidade de partículas (g cm^{-3}) do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	47
Tabela 4 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis encontradas na primeira área de estudo	48
Tabela 5 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis encontradas na segunda área de estudo	49
Tabela 6 - Densidade do solo (D_s), Porosidade total (P_t), Macroporosidade (M_a), Microporosidade (M_i) e Condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta s}$) do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	50
Tabela 7 - Permeabilidade do solo ao ar (K_a) nas tensões 1, 6 e 10 kPa do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	58
Tabela 8 – Propriedades químicas do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	68
Tabela 9 – Nitrogênio total, Carbono orgânico total, Matéria orgânica e Relação C/N do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil	75

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Raiz da espécie <i>P. taeda</i> em decomposição numa área de segunda rotação, Cambará do Sul, RS, Brasil	94
Apêndice B – Atividade da fauna edáfica em área com povoamento de <i>P. taeda</i> em primeira rotação, Cambará do Sul, RS, Brasil	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 A espécie <i>Pinus taeda</i> L.: introdução e perspectivas no Brasil	14
2.2 Qualidade do solo: conceito e sua quantificação	16
2.3 Alterações no solo promovidas pelo pínus	18
2.4 Indicadores da qualidade do solo	21
2.4.1 Propriedades físicas do solo	21
2.4.2 Propriedades químicas do solo	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Caracterização do local de estudo	32
3.1.1 Localização	32
3.1.2 Clima	32
3.1.3 Solo	33
3.1.4 Vegetação natural	34
3.2 Descrições das áreas de estudo	34
3.2.1 Área de primeira rotação	35
3.2.2 Área de segunda rotação	36
3.3 Coleta e análises do solo	38
3.3.1 Análises físicas do solo	40
3.3.2 Análises químicas do solo	44
3.4 Análise estatística dos dados	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Propriedades físicas do solo	46
4.1.1 Análise granulométrica	46
4.1.2 Densidade de partículas e densidade do solo	47
4.1.3 Porosidade total, macro e microporosidade	51
4.1.4 Condutividade hidráulica do solo saturado	55
4.1.5 Permeabilidade do solo ao ar	57
4.1.6 Distribuição do tamanho dos agregados	61

4.2 Propriedades químicas do solo	67
4.2.1 Cálcio e magnésio	67
4.2.2 Fósforo e potássio	70
4.2.3 Alumínio trocável e pH do solo	72
4.2.4 Nitrogênio total e carbono orgânico total	74
5 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICES	90

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal no Brasil permanece em expansão, apresentando participação significativa na economia do país. Diante da crise internacional, que comprometeu a economia e, conseqüentemente, a demanda dos mercados consumidores de produtos florestais, houve reduções nos investimentos nesse âmbito e, mesmo assim, foi verificado o crescimento de áreas florestadas em todo o Brasil. Estima-se que as áreas com florestas plantadas acumularam, em 2009, o total de 6.310.450 hectares com espécies de *Eucalyptus spp* e *Pinus spp* (ABRAF, 2010). Segundo a SBS (2008), existem no país, aproximadamente, 1,8 milhões de hectares de áreas plantadas com espécies do gênero *Pinus* e, desse total, 79% (1.417.850 ha) das áreas concentram-se na região Sul, estando o Rio Grande do Sul com 10% desse percentual (ABRAF, 2010).

Historicamente, uma das principais razões para a introdução do gênero *Pinus* no país foi a necessidade de produção da madeira para o abastecimento industrial, processamento mecânico, produção de madeira serrada, madeira laminada, confecção de painéis ou na produção de celulose e papel. Neste caso, aliado a práticas silviculturais adequadas, o pínus adaptou-se bem ao solo e ao clima local, constituindo-se uma boa alternativa para suprir as demandas dos distintos setores industriais. Desse modo, a região localizada no extremo nordeste foi a que melhor desenvolveu a cultura do pínus no Rio Grande do Sul. No entanto, a expansão de florestas homogêneas tem sido objeto de estudos e discussões no que diz respeito aos impactos ambientais, principalmente em áreas de maior suscetibilidade, como as de ocorrência de Cambissolo Húmico, na região dos Campos de Cima da Serra (NASCIMENTO et al., 2007).

De modo geral, muitos estudos relacionados à introdução do pínus têm inferido alterações físicas benéficas ao solo, bem como alterações químicas desfavoráveis ao mesmo, porém, torna-se difícil prever se esses comportamentos se mantêm ao longo do tempo, pois a grande maioria das pesquisas existentes relacionadas às alterações do solo não consideram seus efeitos nas sucessivas rotações. Além disso, ainda são escassos os estudos que avaliam as alterações promovidas no solo pela conversão do campo em florestamentos de pínus, o que

normalmente deveria ser privilegiado, já que as alterações promovidas no solo refletem as condições da qualidade do mesmo.

Nesse sentido, torna-se necessário avaliar os aspectos relativos aos atributos físicos e químicos do solo, visto que são os mais considerados diante dos impactos e da capacidade produtiva de áreas destinadas à produção florestal. Segundo Gonçalves (2002), a perda da qualidade da maioria dos solos brasileiros está intimamente relacionada à degradação de sua estrutura, portanto, avaliações no sentido de medir as condições de espaço poroso, considerando o fluxo de água e ar do solo, bem como a manutenção da matéria orgânica, são fundamentais quando se espera a sustentabilidade de ecossistemas florestais. Do mesmo modo, são essenciais as avaliações que contemplem os aspectos químicos do solo, pois geralmente a introdução do pínus está associada à depleção de alguns nutrientes, podendo reduzir ainda mais a qualidade química do Cambissolo Húmico.

Diante do exposto, motivou-se a realização do presente estudo, o qual tem por objetivo verificar se a introdução da espécie *P. taeda* em solo sob campo natural pode degradar física e quimicamente a qualidade do Cambissolo Húmico, em diferentes rotações, na região dos Campos de Cima da Serra, RS, Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A espécie *Pinus taeda* L.: introdução e perspectivas no Brasil

O gênero *Pinus* é constituído por um grupo de aproximadamente 90 espécies de árvores da família Pinaceae (MARCHIORI, 2005). No Brasil, suas espécies vêm sendo plantadas há mais de um século pelos imigrantes europeus. No entanto, somente a partir da década de 80, a sociedade brasileira passou a perceber a introdução do gênero *Pinus* no país, quando ocorreram os investimentos em plantios florestais através dos programas governamentais de incentivo fiscal.

A partir da promulgação dos incentivos fiscais, o setor florestal no Brasil teve um crescimento significativo, ocorrido principalmente nas décadas de 70 e 80, quando houve uma intensificação dos plantios de florestas homogêneas, cujo objetivo foi o de promover o uso da madeira proveniente de reflorestamento, reduzindo o desmatamento das florestas nativas (SILVA et al., 2005a; SHIMIZU; SEBBENN, 2008). Portanto, este modelo seguido pelo setor florestal brasileiro substituiu as importações e valorizou a produção local, de forma a dinamizar a economia nacional (TUOTO; HOEFLICH, 2008).

Na região Sul do país, o florestamento não ocorreu de forma diferente, houve uma crescente demanda por matéria-prima devido à escassez da espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, a qual foi submetida à exploração intensiva e abusiva, conforme relatado por Hueck (1972):

A destruição da mata de Araucária ocorreu num espaço de tempo muito curto, sem deixar reservas de matas suficientes para organizar um serviço de reflorestamento. Pelo contrário, em certas épocas foram retiradas madeiras das reservas do governo, sendo lançadas no mercado a preços muito baixos, para contrabalançar dificuldades financeiras do próprio governo.

Diante desse contexto, houve a necessidade de se encontrar uma espécie capaz de substituir a araucária que se adaptasse às condições de clima e solos locais. Assim, a espécie *Pinus taeda* L. constituiu uma forte alternativa para suprir a demanda de matéria-prima para os diversos setores industriais, devido às condições de adaptação aos solos ligeiramente ácidos, à facilidade nos tratamentos culturais e ao rápido crescimento (KRONKA et al., 2005; SHIMIZU; SEBBENN, 2008), além das

baixas exigências nutricionais, se comparada ao *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005).

A espécie *P. taeda* é oriunda das planícies adjacentes do Golfo do México e da costa atlântica do sudeste dos Estados Unidos, apresentando uma distribuição mais ampla que o *P. elliottii* e sendo conhecida por “Loblolly pine” (MIROV, 1967; MARCHIORI, 2005; KRONKA et al., 2005). O clima naquelas regiões é úmido e temperado, apresentando precipitação pluviométrica média anual de 1.020 mm a 1.520 mm e temperatura média anual variando entre 13° C a 24° C (FOWELLS, 1965), evidenciando boa plasticidade da espécie quanto à adaptação climática (SCHULTZ, 1997).

Atualmente, o *P. taeda* é considerada a espécie madeireira mais importante nos Estados Unidos e no Sul do Brasil, sendo cultivada nas terras mais altas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense. As árvores podem alcançar cerca de 20 m de altura e 100 cm de diâmetro de altura do peito, produzindo copa densa, casca gretada e ramos acinzentados. A madeira é indicada para construções, móveis, caixotaria, e suas fibras são longas e adequadas à fabricação de papel (MARCHIORI, 2005).

No Brasil, a madeira de *P. taeda* é destinada ao processamento mecânico na produção de peças serradas para estruturas, à fabricação de móveis, embalagens, molduras, chapas e, ainda, à fabricação de celulose e papel (CARON NETO, 2001; KRONKA et al., 2005; SHIMIZU; SEBBENN, 2008).

Na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, o incremento médio anual destinado à produção de madeira para a fabricação de celulose e papel é de aproximadamente 38 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (ABRÃO, 2008). Contudo, a produtividade dos povoamentos florestais é uma consequência direta das condições ecológicas do local de plantio e do potencial das espécies em utilizar os recursos naturais disponíveis para o seu crescimento (SHIMIZU; SEBBENN, 2008). Neste sentido, os autores Reissmann; Wisniewski (2005) relatam que o *P. taeda* demonstra uma extraordinária capacidade de aproveitamento dos recursos nutricionais em sítios de baixa fertilidade, porém, nesse caso, o crescimento da espécie normalmente é afetado (RIGATTO et al., 2005).

Estima-se que as áreas com florestas plantadas de *Pinus* sp., no Brasil, acumularam em 2009 o total de 1.794.720 ha, distribuídos nos estados de maior produção, como Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (ABRAF, 2010).

Entretanto, o consumo de madeira de pínus nos últimos anos cresceu de tal maneira que as atividades de implantação não ocorreram na mesma ordem da colheita, fato que ocasionou um descompasso em abastecimento de madeira oriunda dessa espécie, podendo-se agravar ainda mais (MORO, 2005).

Diante da crescente escassez de florestas produtivas e de matérias-primas providas da madeira de pínus, tem-se dificultado grandes expansões da produção de madeira serrada e compensados no mundo inteiro (NAHUZ, 2004). No Brasil, espera-se um déficit de pouco mais de 27 milhões de metros cúbicos para 2020, considerando somente toras de *Pinus* sp., (TUOTO, 2003), reafirmando a importância do gênero no contexto econômico e social do país.

2.2 Qualidade do solo: conceito e sua quantificação

As definições de qualidade do solo têm sido relacionadas à capacidade do solo de exercer várias funções dentro dos limites do ecossistema, tendo em vista a sustentabilidade e a produtividade biológica, a manutenção da qualidade da água e do ar e a contribuição para a saúde humana, de plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1994). Dessa forma, a qualidade física do solo está associada às condições que permitem a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas; resposta ao manejo e resistência à degradação; trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e crescimento do sistema radicular (REICHERT et al., 2003). Outros conceitos utilizados com o mesmo objetivo são demonstrados pelas seguintes expressões: “capacidade de garantir a sua função ecológica de acordo com um determinado uso”, ou “cumprindo sua função principal, sem ameaçar as demais” (DORAN; PARKIN, 1994; NOVÁK et al., 2010). Portanto, de acordo com essas concepções, a qualidade do solo irá depender de funções determinadas pela utilização humana, ou seja, relacionadas às práticas de uso e manejo empregadas, podendo ser de caráter agrícola ou florestal (NOVÁK et al., 2010).

Atualmente, o avanço das culturas anuais e dos florestamentos tem sido objeto de estudos e discussões no que diz respeito aos impactos ambientais, principalmente em relação ao cultivo em áreas de maior suscetibilidade, como as de ocorrência de Cambissolo Húmico (NASCIMENTO et al., 2007). Devido a sua formação recente, os Cambissolos são definidos como solos frágeis quanto aos

seus aspectos morfogenéticos, sendo considerados unidades pedológicas em plena transformação, com baixo grau de intemperismo, e caracterizados por apresentar um horizonte B incipiente e elevados teores de silte ao longo do perfil. Deste modo, os elevados teores de silte em relação à argila podem promover o selamento superficial de algumas camadas, dificultando a infiltração de água e aumentando, dessa forma, o escoamento superficial e a erosão no solo (RESENDE et al., 1999), fatores que tornam esses solos suscetíveis a problemas ambientais.

Sabe-se que a remoção da vegetação natural geralmente causa grandes alterações edáficas, mas, em longo prazo, o que irá determinar as condições físicas, químicas e biológicas do solo serão a forma e o grau de perturbação antrópica (GONÇALVES, 2002). Para a quantificação dessas alterações, são geralmente utilizados indicadores da qualidade do solo, definidos como propriedades mensuráveis capazes de influenciar a produção de culturas ou o desempenho de funções ambientais do solo. Dentre os indicadores estão os atributos físicos, químicos e biológicos, os quais expressam a condição da qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; DEDECEK, 2008).

Devido a muitas influências e fatores que interferem nas condições edáficas, um único indicador não consegue quantificar todos os aspectos da qualidade do solo e, portanto, faz-se necessária a utilização de um conjunto de indicadores (DORAN; PARKIN, 1994). Assim, por estarem mais associados à produtividade dos povoamentos florestais, os aspectos relativos aos atributos físicos e químicos do solo são os mais considerados ao se avaliar os impactos e a capacidade produtiva das áreas destinadas à produção florestal (CARVALHO et al., 1999; BELLOTE; DEDECEK, 2006; SILVA et al., 2008a). Nesse sentido, faz-se necessária a adoção destes indicadores para a adequação aos objetivos das plantações florestais, permitindo o desenvolvimento de forma sustentável (NAMBIAR, 1999).

Portanto, diante do exposto, os estudos que visam analisar as alterações causadas pela intensificação do uso e manejo sobre as propriedades do solo constituem valiosos recursos para avaliações ou previsões, servindo de subsídios para a discussão da manutenção destes ecossistemas, e também para a definição de espécies e práticas de manejo do solo adequadas, tornando-o menos suscetível à perda da capacidade produtiva (CARVALHO et al., 1999; LONGO et al., 1999; NEVES et al., 2007). Assim, o conhecimento dos atributos do solo e suas

implicações são requisitos básicos para o entendimento e conservação do ambiente e, em especial, do solo (RIGATTO et al., 2005).

2.3 Alterações no solo promovidas pelo pínus

No Brasil, a expansão de florestas homogêneas, como as de eucalipto e de pínus em larga escala, têm ocupado extensas áreas. No entanto, ainda são poucos os estudos a respeito dos impactos que estes florestamentos podem causar ao solo (MARTINS et al., 2002), sendo que vários trabalhos já demonstraram que mudanças no tipo de cobertura vegetal determinam variações na qualidade estrutural do solo. Estudos como o de Cavenage et al. (1999); Araújo et al. (2007) e Melloni et al. (2008) retrataram alguns desses aspectos. Araújo et al. (2007) avaliaram a qualidade do solo em povoamentos de *P. elliotii* e em outros tipos de usos, observando melhorias nas propriedades físicas do solo na área com pínus, atribuindo a esse resultado um possível reflexo da não mobilização do solo e da manutenção de uma camada de serapilheira sobre a superfície.

Nesse sentido, Morales et al. (2010), considerando sítios com povoamentos de *P. taeda* em terceira rotação, encontraram alta estabilidade dos agregados. Nestes locais, foi observado valor de diâmetro médio geométrico de 4,5 mm, que prevaleceu até a profundidade de 0,6 m, indicando solos com elevada estabilidade de agregados e sugerindo, por meio deste atributo, a manutenção da qualidade dos solos. Todavia, esse estudo não considera as condições de agregação do solo anterior à implantação do *P. taeda*.

No entanto, estudando atributos indicadores da qualidade do solo, como a matéria orgânica, Brun (2008) observou que a densidade do solo apresentou valores mais baixos em campo nativo queimado e na Floresta Ombrófila Mista do que em povoamentos de *P. taeda*. Os resultados superiores foram atribuídos a um possível adensamento do solo, proporcionado pelas atividades de manejo florestal e pela pressão exercida pelo crescimento das raízes do pínus, o que sugere uma possível redução na qualidade do solo diante deste atributo. Além disso, Brun (2008) encontrou valores de densidade do solo relativamente baixos, os quais foram justificados em função dos altos teores de matéria orgânica do Cambissolo Húmico.

Contudo, avaliando povoamentos de *Pinus sylvestris* L. e solos cultivados, em Cambissolo, não foram obtidas diferenças significativas entre as densidades do solo,

considerando um período de até 50 anos; entretanto, foram observadas pequenas reduções na densidade do solo com o aumento da permanência do florestamento na área (MACIASZEK; ZWYDAK, 1996 apud OLSZEWSKA; SMAL, 2008). O mesmo tem sido relatado por Liu et al. (2002), os quais encontraram reduções da D_s relacionadas ao tempo de florestamento (aproximadamente 15 anos), evidenciando que em longo prazo ocorrem efeitos benéficos a partir da interação da cobertura florestal com o solo.

Quanto ao aspecto poroso do solo, analisando um campo nativo após um ano da implantação da espécie *P. taeda* em Cambissolo Húmico, percebe-se que foi significativo o aumento da porosidade total, em que a maior concentração de poros ocorreu na superfície (0 a 20 cm), em função da existência de maior quantidade de matéria orgânica, atividade biológica e abundância de raízes finas (SCHUMACHER et al., 2000). Do mesmo modo, em estudo realizado em solos arenosos, o aumento da porosidade total e a diminuição da densidade do solo ocorreram em virtude da conversão do campo em povoamentos de *Pinus silvestris*. Nesse trabalho, a porosidade total no horizonte mais superficial foi, em média, de 1,08 a 1,12 vezes maior em povoamentos jovens e mais velhos do que em relação ao campo (OLSZEWSKA; SMAL, 2008). Portanto, observa-se que em solos com maiores teores da fração areia, o efeito da matéria orgânica proporcionado pela cobertura florestal é o principal atuante na estabilização dos agregados e, conseqüentemente, no aumento da porosidade total no solo. Para Cambissolos, em profundidade semelhante, Maciaszek; Zwyzak (1996 apud OLSZEWSKA; SMAL, 2008) perceberam aumentos da ordem de 1,06 a 1,10 vezes maior no pínus do que em relação ao campo.

Em estudo avaliando diferentes preparos do solo para a implantação florestal, numa área onde anteriormente havia povoamento de *P. taeda*, foram encontrados valores de condutividade hidráulica do solo saturado quase que duas vezes maiores nas áreas com revolvimento mais intensivo, comparado aos demais tratamentos na mesma profundidade (0 a 10 cm) (CAVICHIOLO, 2005). A maior condutividade na camada superficial dos tratamentos com revolvimento foi atribuída à maior proporção de macroporos gerada no preparo do solo, sendo responsáveis por drenar a água mais rapidamente. Na ausência de revolvimento superficial (tratamento sem preparo), a maior permeabilidade em superfície foi relacionada com

a maior quantidade de matéria orgânica, sugerindo que o pínus favoreceu esses altos teores, elevando também os valores da condutividade hidráulica.

Com relação as alterações nas propriedades químicas do solo, alguns trabalhos têm mostrado os efeitos do florestamento de pínus sobre a acidez do solo, como o de Prado; Natale (2003), os quais constataram que o pínus foi o cultivo que mais acidificou o solo na camada superficial (0 a 10 cm), atribuindo o resultado à decomposição das acículas que recobrem o solo, baixando o valor de pH e aumentando o teor de alumínio. Em outro trabalho envolvendo atributos químicos em solos sob diferentes coberturas (campo nativo, pínus, reflorestamento de araucária e araucária nativa), foi novamente observado, em todas as camadas avaliadas, valores menores de pH nos plantios de *P. taeda*, com 12 e 20 anos de idade, apresentando valores entre 4,5 a 5,3 (MAFRA et al., 2008). Cabe ressaltar, que os valores de pH encontrados não são considerados comprometedores no desenvolvimento da própria espécie, visto que, o *P. taeda* cresce rapidamente em solos que apresentam pH dentro de uma faixa de 4,5 a 6,0 (SCHULTZ, 1997).

Costa Lima et al. (1995) observaram que o *P. elliotii* foi eficiente na manutenção do estoque de carbono total do solo, sendo capaz de aumentá-lo na superfície. O mesmo foi evidenciado por Mafra et al. (2008), que verificaram que os reflorestamentos com pínus e araucária mantiveram os estoques de carbono orgânico, na camada mais superficial, em níveis semelhantes aos da mata e campo nativo. Por outro lado, os teores de carbono orgânico não são apenas elevados no solo, mas também na serapilheira, os quais foram maiores nas áreas com *P. taeda* e com floresta nativa, quando comparados com o campo, mostrando o potencial que os resíduos florestais têm em devolver carbono ao solo (BRUN, 2008).

Diante dessas evidências, torna-se necessário aprofundar os estudos das possíveis alterações físicas e químicas do solo, promovidas pela conversão do campo natural em povoamentos de *P. taeda* ao longo das rotações, visto que a grande maioria das pesquisas não considera o solo sob vegetação original ou não avalia as sucessivas rotações, as quais podem refletir as condições da qualidade do solo de um determinado período.

2.4 Indicadores da qualidade do solo

2.4.1 Propriedades físicas do solo

As propriedades físicas do solo são importantes componentes na avaliação das condições da qualidade do solo, ou seja, de sua capacidade produtiva, uma vez que influenciam a aeração, a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água para as plantas (BOGNOLA et al., 2010). Desse modo, o solo que é mantido em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas, como densidade, porosidades, agregação e permeabilidade consideradas adequadas (ANDREOLA et al., 2000). Entretanto, quando o solo é submetido ao processo produtivo, as características físicas podem sofrer alterações (NEVES et al., 2007), tornando-se fundamental a avaliação desses atributos após a introdução de atividades de caráter antrópico, devido ao fato de serem capazes de promover a perda da qualidade estrutural e aumentar a suscetibilidade à erosão (BERTOL et al., 2001).

De forma geral, apesar de inúmeros questionamentos sobre os possíveis impactos ambientais proporcionados ao solo com relação à introdução de atividades florestais, existem poucos estudos que avaliam as alterações físicas e as condições da qualidade estrutural promovidas pela substituição do campo por povoamentos de pínus. Nesse caso, geralmente considera-se que o solo de campo apresenta características físicas, tal como a agregação, mais favoráveis do que outros usos, proporcionando condições mais adequadas ao crescimento das plantas. Este resultado, na maioria das vezes, é atribuído à maior quantidade de matéria orgânica e raízes que contribuem para a aproximação das partículas do solo, indicando, assim, que as pastagens normalmente incrementam o teor de matéria orgânica e a estabilidade de agregados do solo (LIMA et al., 2008).

Ao comparar-se povoamentos florestais com a mata nativa, esta última apresentou os maiores valores de diâmetro médio geométrico (DMG), evidenciando maior grau de estruturação do solo. Esse efeito foi também condicionado pela maior presença de raízes que liberam exsudatos e elevam os teores de material orgânico no solo, através da ciclagem bioquímica, contribuindo para a estabilização de agregados (MARTINS et al., 2002). Além disso, os autores ressaltaram a ampla diversidade arbórea, formando uma camada de serapilheira mais rica em nutrientes,

e aumentando, assim, a atividade dos organismos no solo. Portanto, diante do exposto e em conformidade com o que é sugerido por Kiehl (1979), a estabilidade de agregados, expressa pela distribuição de tamanho de agregados, pode ser utilizada para se avaliar a qualidade estrutural do solo, uma vez que a estabilidade da estrutura está relacionada à resistência que os agregados do solo apresentam à influência desagregante da água e forças mecânicas (GAVANDE, 1976).

Dessa maneira, mudanças no uso do solo, variações na atividade e natureza de micro-organismos, ação do sistema radicular (REICHERT et al., 2003) e a própria qualidade do material orgânico depositado, podem alterar de forma permanente ou temporária as condições de agregação do solo e, por conseguinte, a estabilidade dos agregados (BOCHNER et al., 2008; WOHLBERG et al., 2004). Logo, a estabilidade de agregados, como atributo físico, torna-se fundamental na avaliação da qualidade estrutural, visto que a mesma é sensível a variações no uso do solo, podendo identificar possíveis alterações promovidas pela introdução do pínus em áreas de campo natural.

A densidade real ou densidade de partículas do solo (D_p) corresponde ao quociente da sua massa pelo seu volume seco, considerando-se apenas a matriz do solo, sem levar em conta o seu arranjo e orientação (KLEIN, 2008). Como os sólidos do solo são originados de diversos materiais, possivelmente diferentes classes de solos terão densidades distintas. Para a maioria dos solos, os valores oscilam entre 2,60 e 2,75 $Mg\ m^{-3}$, referentes à densidade do quartzo, feldspato e silicatos coloidais (BRADY, 1989), entretanto, o valor pode chegar a 1,25 $Mg\ m^{-3}$ em horizontes que apresentam alto teor de material orgânico (COSTA, 2004).

Nesse sentido, a fim de avaliar a qualidade do solo em diferentes coberturas florestais e pastagem, Melloni et al. (2008) perceberam que a densidade de partículas foi menor na área com mata nativa, sendo esta propriedade física maior e igual nos demais ecossistemas (eucalipto, araucária implantada e pastagem). O estudo concluiu que os teores de MO foram eficientes e discriminatórios nos ecossistemas com coberturas florestais e pastagem, influenciando significativamente a D_p . Portanto, o conhecimento da densidade de partículas é fundamental não somente para determinar a porosidade total, mas também para inferir sobre a qualidade do solo, visto que esta varia conforme o uso e a forma de manejo adotados, sendo importante na avaliação das alterações ocorridas no solo.

Já a densidade do solo (D_s) pode ser definida como a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110°C e sua unidade de volume ocupado pelas partículas e pelos poros (KIEHL, 1979; BRADY, 1989), de modo que os solos com elevada proporção de espaços porosos em relação aos sólidos, como os de textura fina e franco-siltosos, terão densidades menores (BRADY, 1989). De forma geral, a faixa de densidade para solos minerais é estabelecida entre os valores de 1,10 e 1,60 Mg m^{-3} (KIEHL, 1979), mas em solos florestais tais valores podem variar de 0,20 Mg m^{-3} , em camadas mais orgânicas, até 1,90 Mg m^{-3} , em solos mais arenosos (PRITCHETT; FISHER, 1987).

Sendo assim, a D_s mostra-se eficiente na busca por respostas quanto a alterações promovidas pela introdução de uma nova espécie. Neste sentido, avaliando uma área de campo nativo após um ano da implantação do *P. taeda*, foram observadas reduções nos valores de densidade do solo, os quais foram justificados pela presença do sistema radicular do pínus, proporcionando maior aeração à estruturação ao solo (SCHUMACHER et al., 2000). No mesmo estudo, a D_s até os 30 cm de profundidade não passou de 1,0 Mg m^{-3} , logo, os autores ainda afirmaram que, do ponto de vista físico, o meio se encontra em condições ideais para o desenvolvimento do sistema radicular do pínus. Comportamento semelhante foi evidenciado por Rigatto et al. (2005) que, verificando os efeitos de atributos físicos na produtividade de sítios com povoamentos de *P. taeda*, aos 12 anos de idade, encontraram menores valores de D_s na profundidade de 0 a 10 cm. A explicação para os menores resultados nessa camada foi associada à manutenção da MO, sempre maior na superfície do solo.

Dalben; Osaki (2008), comparando floresta nativa e povoamento de *P. taeda* de 21 anos de idade, em Cambissolo Háplico, observaram maior densidade no ecossistema floresta nativa, nas profundidades de 0 a 20 e de 20 a 40 cm. Este resultado estaria relacionado à superioridade da espessura de serapilheira presente na área com povoamento de pínus. Por outro lado, em estudo comparativo entre lavoura sob plantio convencional, mata nativa, campo nativo e reflorestamento com *P. elliottii*, em Cambissolo Húmico, foi constatado que os diferentes usos não afetaram a densidade na profundidade de 15 a 20 cm, indicando que a influência do sistema radicular sobre a matéria orgânica é expressiva apenas na camada mais superficial do solo (BERTOL; SANTOS, 1995).

Diante do exposto, percebe-se que são escassos os trabalhos que auxiliam na verificação de possíveis alterações na D_s sob campo natural após a implantação de atividades florestais, visto que a grande maioria das pesquisas compara diferentes usos, mas desconsidera as sucessivas rotações florestais ao longo do tempo. Portanto, a avaliação da D_s é importante para demonstrar a manutenção da qualidade estrutural do solo. Porém, cabe ressaltar que, embora a densidade de alguns solos seja baixa, possivelmente eles terão maior porosidade dominada por poros de diâmetros menores, o que poderá promover a redução dos fluxos da água e do ar no solo. Portanto, a D_s é uma variável que permite apenas avaliar qualitativamente a estrutura do solo, visto que, a mesma não indica o tamanho e a continuidade dos poros que determinam o fluxo do ar e da água no perfil (DEDECEK, 2008).

A porosidade é uma propriedade importante que deve ser considerada na avaliação da qualidade estrutural do solo (MARTINS et al., 2002), porque se refere à parte do volume de solo não ocupado por partículas sólidas (KIEHL, 1979; PRITCHETT; FISHER, 1987) e, dessa forma, responsável pelo armazenamento e transporte da água e do ar no solo (BELLOTE; DEDECEK, 2006). Neste sentido, essas funções não dependem somente da porosidade total (P_t), mas também de como o espaço poroso é distribuído por tamanho, ou seja, a quantidade de macro (M_a) e microporos (M_i) que constituem a estrutura do solo (PREVEDELLO, 1996).

De acordo com Prevedello (1996), o solo considerado com boa porosidade deve ter 1/3 de macro e 2/3 de microporos e, além disso, necessita apresentar volume de poros de aeração superior a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (BAVER et al., 1972; HILLEL, 1998). No caso de concentração de oxigênio abaixo de 10%, esta poderá comprometer o crescimento das plantas devido à falta de oxigenação do solo, tão vital para as atividades necessárias no ambiente edáfico (OLIVEIRA et al., 1998). Entretanto, solos com macroporos superiores ao ideal terão dificuldade em formar fluxo contínuo de água, dificultando a movimentação dos nutrientes até a zona radicular das plantas (BOGNOLA et al., 2010).

Juntamente com a densidade do solo, a porosidade é um parâmetro relacionado às alterações no volume de solo e, portanto, altamente influenciada pela compactação. Geralmente quando acontece a redução da porosidade, esta ocorre primeiramente nos poros maiores que $50 \mu\text{m}$ (macroporos), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo (REICHERT et al., 2007), sendo, portanto,

fundamental a quantificação da porosidade para avaliar-se a qualidade estrutural do solo, principalmente após alterações no uso do mesmo.

Diante do exposto, Bertol et al. (2001) corroboram afirmando que o solo submetido ao processo produtivo tende a perder sua estrutura original, o que normalmente está associado a reduções no volume de macro e aumentos de microporos e densidade do solo, sendo esta última inversamente relacionada à porosidade total (REICHERT et al., 2007). O mesmo comportamento tem sido relatado por Bertol; Santos (1995) e Rigatto et al. (2005).

Com o objetivo de analisar as alterações nas propriedades físicas de um Latossolo sob diferentes culturas e sua capacidade de recuperação, foi observado que os diferentes usos do solo promoveram alterações nos atributos físicos em relação à vegetação natural de cerrado (CAVENAGE et al., 1999). Nesse estudo, a mata ciliar e o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentaram valores de macroporos mais próximos das condições típicas do solo, atribuindo ao resultado o fato de as espécies florestais interagirem, a longo prazo, com o ambiente edáfico. Os autores ressaltaram a importância da cobertura florestal, as quais promovem diferentes efeitos na restauração das condições originais do solo, uma vez que as espécies diferem quanto à dinâmica do sistema radicular, às características da serapilheira, às atividades biológicas no solo e à interceptação da luz, entre outros.

No entanto, a qualidade do sistema poroso do solo não pode ser avaliada apenas através de seus volumes ou pela forma como os poros são distribuídos, também deve-se considerar a capacidade em transmitir fluidos, como água ou gases (DORNER; HORN, 2009). Nesse propósito, a condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta s}$) tem sido amplamente utilizada em pesquisas, sendo um dos principais atributos considerados na avaliação das características físicas do solo, por controlar diretamente a infiltração de água, bem como as redistribuições e trocas gasosas no perfil (BAVER et al., 1972; HILLEL, 1998). Dessa forma, a condutividade hidráulica é influenciada fortemente pela textura e a estrutura do solo (BRANDÃO et al., 2006); entretanto, a $K_{\theta s}$ é mais dependente da estrutura do que da textura, considerando-se que a mesma depende, entre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros preenchidos com água (SOUZA; ALVES, 2003; MESQUITA; MORAES, 2004) e, portanto, está sujeita às alterações estruturais promovidas pelos diferentes usos do solo, justificando sua utilização na avaliação da qualidade deste.

Como se vê, a $K_{\theta s}$ é um dos atributos que melhor refletem a degradação do sistema poroso, pois baixos valores podem inferir aspectos como presença de camadas compactadas, redução e descontinuidade de poros (MESQUITA; MORAES, 2004). Nesse caso, a $K_{\theta s}$ é considerada boa indicadora da qualidade estrutural do solo, principalmente no que se refere à distinção dos efeitos proporcionados pela introdução de povoamentos exóticos e, portanto, contribui para o monitoramento da qualidade do solo nesses ecossistemas (NEVES et al., 2007; SILVA et al., 2008b; MARTINS et al., 2002). Neste sentido, a seguir, alguns trabalhos revelam os aspectos aqui relatados, no entanto, cabe ressaltar que, apesar da fundamental importância da avaliação da $K_{\theta s}$ visando o monitoramento da qualidade estrutural do solo, são escassos os estudos na área florestal que utilizam tal atributo para essa finalidade.

Estudando diferentes sistemas de manejo, Dalbianco (2009), observou relação entre a condutividade hidráulica e o espaço poroso do solo, em que a microporosidade e a densidade do solo afetaram negativamente a $K_{\theta s}$, enquanto que a macro e a porosidade total tiveram relação positiva. No mesmo estudo, a redução da M_a justificou os menores valores de $K_{\theta s}$ na área com campo nativo, tendo em vista que a correlação entre essas duas variáveis foi altamente significativa. Além disso, neste mesmo estudo, foi verificada melhoria na estabilidade de agregados decorrente da maior quantidade de carbono orgânico, a qual proporcionou maiores valores de $K_{\theta s}$. Já estudando os atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho-amarelo, foram encontradas maiores correlações entre D_s e $K_{\theta s}$ ($r=-0,82$), D_s e M_a ($r=-0,85$) e entre M_a e $K_{\theta s}$ ($r=0,86$) (SILVA et al., 2008b).

Em trabalho avaliando a condutividade hidráulica em sistema de plantio direto, notou-se que o mesmo foi 38 vezes menor do que na área de mata, apresentando, inclusive, reduções causadas pelo pisoteio animal no sistema lavoura-pecuária (BERTOL et al., 2001). Já em Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo e campo nativo foi observado que este último apresentou maior $K_{\theta s}$, o qual associaram aos maiores valores de M_a , P_t , agregação e menor D_s (LIMA et al., 2008). Nesse sentido, estudando as alterações em atributos físicos de um Latossolo com sistema agrossilvipastoril, observou-se que a adoção desse sistema aumentou significativamente a resistência do solo à penetração e reduziu a $K_{\theta s}$ e o carbono orgânico total, notadamente na camada superficial (0,0 a 0,05 m), quando comparado com o cerrado nativo (NEVES et al., 2007).

De modo geral, os estudos têm demonstrado que as determinações da condutividade hidráulica do solo saturado apresentam resultados com elevada dispersão, condicionada muitas vezes pela alta variabilidade da macroporosidade, que apresenta coeficientes de variação oscilando entre 15 e 20%. Portanto, torna-se comum a $K_{\theta s}$ apresentar altos coeficientes de variação ($> 70\%$), bem como elevados valores de desvio padrão, indicando que sua utilização como parâmetro hidráulico é altamente variável (MESQUITA; MORAES, 2004; MARQUES et al., 2008). Além disso, a $K_{\theta s}$ é dependente de inúmeros atributos, dentre os quais estão a densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e microporosidade (MESQUITA; MORAES, 2004), além de infiltrações preferenciais em macroporos ou ao longo das raízes, (SOUZA; ALVES, 2003), aumentando ainda mais a tendência de variação da $K_{\theta s}$. Nesse caso, devido à grande variabilidade existente, é comum não encontrar diferenças significativas entre os tratamentos e, portanto, sugere-se que esse parâmetro seja analisado juntamente com outros indicadores (REICHERT et al., 2007) nas avaliações de qualidade do solo.

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é um atributo que representa a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar, visto que é dependente da estrutura do solo (TULI et al., 2005; IVERSEN et al., 2001), sendo fortemente influenciada pelos fatores geométricos do sistema poroso, tais como porosidade total, tamanho e distribuição dos poros, continuidade e tortuosidade (DORNER; HORN, 2009) e, particularmente, tamanho e continuidade dos macroporos; justificando sua utilização na estimativa do espaço poroso (SILVA et al., 2009). Portanto, assim como a $K_{\theta s}$, a permeabilidade do solo ao ar está sujeita às alterações estruturais promovidas pelos diferentes usos, sendo, também, importante nas avaliações das condições da qualidade estrutural do solo, diante da substituição do campo por povoamentos de pinus, por exemplo.

Assim, solos que apresentarem alta taxa de K_a têm maior capacidade de realizar trocas gasosas e transmitir fluidos em geral, possuindo uma melhor aeração. Por outro lado, solos com pequena permeabilidade ($1\mu\text{m}^2$) podem ser considerados impermeáveis, no entanto, deve-se avaliar a influência do conteúdo de água no solo, pois o fluxo de ar se reduz à medida que diminui o diâmetro do poro e aumenta a saturação de água.

Como se vê, é fundamental que se determine o conteúdo de água no solo ao medir a permeabilidade, pois com o aumento da argila a K_a decresce mais

rapidamente com a retenção de água, devido à estrutura dos solos argilosos possuir macroporos mais contínuos do que os arenosos. Nesse sentido, McCarthy; Brown (1992) perceberam relações entre a K_a e a estrutura e textura do solo, encontrando, através do estudo, maior permeabilidade em solos estruturados (argila > 20%), devido ao maior fluxo de canais interagregados.

Por isso, qualquer ação que altere a proporção do espaço poroso, conseqüentemente, pode comprometer a retenção de água e o fluxo de gases. Muitas práticas de manejo florestal podem atuar nesse sentido, como o corte mecanizado e a escarificação, porém, poucos são os estudos sobre as propriedades que implicam a troca gasosa em áreas com essas atividades (LAURÉN, 1997), justificando o interesse em utilizar esse atributo na avaliação das alterações na qualidade estrutural do solo, após a conversão do campo em plantios de pínus.

Em estudo comparando a permeabilidade do solo ao ar em florestas de *P. sylvestris* (baixa e média fertilidade) e *Picea abies*, não foram encontradas diferenças significativas para este atributo. Entretanto, observou-se que a elevada retenção de água possivelmente estava relacionada com o alto grau de humificação do solo, visto que o material orgânico pode formar agregados nos quais a água é absorvida primeiro, deixando, assim, poros interagregados mais abertos para o fluxo de ar (LAURÉN et al., 2000). Os autores ainda ressaltam que a serapilheira e as condições de decomposição da MO variam de acordo com a posição em relação à copa, promovendo variações também na permeabilidade.

2.4.2 Propriedades químicas do solo

Os Cambissolos apresentam naturalmente altos níveis de matéria orgânica nos horizontes superficiais, baixos teores de Ca, Mg e K, baixo pH e altos níveis de alumínio trocável, características resultantes do clima frio e úmido predominante na região, que favorecem o acúmulo de matéria orgânica, mas ao mesmo tempo, induzem à alta taxa de lixiviação, tornando esses solos pobres em nutrientes (BRASIL, 1973; ALMEIDA, 2009). Esse aspecto é comprovado através da extrema adaptabilidade das espécies de gramíneas neste ambiente (BOLDRINI et al., 2009), devido ao ecossistema campo nativo, com predomínio de gramíneas, ser pouco exigente e se manter por meio da ciclagem de nutrientes (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005). No entanto, sua substituição por florestamentos é motivo de

inquietação, pois apesar da baixa exigência nutricional da espécie *P. taeda*, alguns estudos mostram que os plantios de pínus podem reduzir teores de nutrientes no solo.

Segundo Lepsch (1980), a implantação de florestamentos pode promover alterações nas propriedades químicas do solo em função do tempo de cultivo, reduzindo as bases trocáveis, o que pode agravar ainda mais a fertilidade do solo. Ferreira et al. (2001) corroboram afirmando que rotações curtas, sem previsão de um período mínimo necessário para reposição de nutrientes, têm sido um dos principais fatores responsáveis pelo exaurimento do solo, através da exportação de nutrientes proporcionada pela colheita florestal, considerada uma preocupação na manutenção da produtividade dos sítios.

Nesse sentido, os macronutrientes mais importantes absorvidos do solo pelas espécies de pínus são o nitrogênio e o fósforo, seguidos do potássio, enxofre, magnésio e cálcio (MIROV, 1967). Entretanto, quando se estuda os plantios florestais, deve-se considerar a presença da serapilheira, na qual ficam armazenadas grandes quantidades de nutrientes, principalmente N, P e Ca, que permanecem imobilizados se a decomposição for muito lenta. Desse modo, os que são mineralizados podem ser absorvidos pelas raízes finas que permeiam a serapilheira acumulada ou lixiviados pela água da chuva (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005).

Em solos ácidos, geralmente ocorrem aumentos da camada húmica, assim como das proporções de alumínio trocável e íons H^+ , reduzindo os teores de Ca, Mg e K (PRITCHETT; FISHER, 1987). Efeito semelhante foi observado monitorando florestamentos com *Pinus sylvestris*, em que após 30 anos houve redução do pH e da saturação de bases no solo, principalmente dos teores de Ca, Mg e K (PRIETZEL et al., 2006). Em face do exposto, Andrae (1978) exemplifica afirmando que em ambientes ácidos e com baixos teores de bases ocorre transformação mais lenta da matéria orgânica, regida principalmente por fungos. Desse modo, os ácidos orgânicos migram como complexos pouco ou não saturados, formando complexos de Fe a Al com bases que são facilmente lixiviadas. Este comportamento foi reportado por Lepsch (1980) e Olszewska; Smal (2008).

De modo geral, as reduções das bases trocáveis no solo normalmente vêm associadas às elevações nas concentrações de alumínio, bem como à diminuição do pH, visto que a acidez do solo atua indiretamente sobre as condições do solo,

principalmente na atividade microbiana e na disponibilidade de muitos nutrientes (PRITCHETT; FISHER, 1987), como relatado anteriormente. Reduções nos valores de pH têm sido encontradas por Lepsch, (1980) e Wiesmeier et al. (2009).

Logo, a introdução de plantios florestais pode alterar os processos naturais de ciclagem e armazenamento de nutrientes, devido principalmente às mudanças ocasionadas na qualidade da matéria orgânica pelas práticas de manejo adotadas, sendo considerada, portanto, boa indicadora da qualidade do solo. Diante disso, variações da matéria orgânica dificultam a sustentabilidade do sítio florestal, pelo importante papel da mesma nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (NAMBIAR; BROWN, 1997). Sendo assim, a manutenção de níveis apropriados da MO é fundamental, devido a sua participação em inúmeros processos, como na retenção e liberação de nutrientes, na estabilização de agregados, na porosidade, na dinâmica da água, assim como na atenuação da erosão e em proporcionar um ambiente adequado para a fauna do solo (COSTA LIMA et al., 1995).

Nesse aspecto, considera-se que as raízes das gramíneas são anualmente renovadas e, assim, proporcionam maior incorporação da matéria orgânica no horizonte A dos solos do que a manta vegetal das florestas plantadas. No entanto, a maior quantidade de serapilheira dos povoamentos de eucaliptos e pínus podem incorporar MO à camada mineral superficial do solo em pouco tempo, atingindo uma quantidade em equilíbrio com as condições do ambiente (LEPSCH, 1980). Além da serapilheira, deve-se considerar conjuntamente a atuação das micorrizas, que contribuem para aumentar a matéria orgânica e promover a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais, além de serem responsáveis por cerca de um terço do N e P presentes no solo (PRITCHETT; FISHER, 1987).

As substâncias orgânicas no solo podem ser mineralizadas e humificadas, processos que são influenciados pelo clima e vegetação do local. Na área de estudo, é comum a formação de uma espessa camada húmica, favorecida pelo clima frio e úmido da região (MOSER, 1990; STRECK et al., 2008; ALMEIDA, 2009), indicando uma possível imobilização de nutrientes (ANDRAE, 1978). As florestas de pínus são consideradas uma vegetação acidificante, a saber, apresentam reflexos diretos nos valores de pH, aumentando o conteúdo de húmus no solo e elevando as relações C/N, C/P, C/K e C/Ca, inferindo por meio dessas a lenta decomposição da MO e a alta capacidade de estoque do carbono no solo (ANDRAE, 1978). Portanto,

a redução do MO pode diminuir a disponibilidade de nutrientes e o potencial de sequestro de C do solo mineral (WIESMEIER et al., 2009).

Diante do exposto, faz-se necessária a avaliação das possíveis alterações químicas no solo promovidas pela conversão do campo natural em plantios de pínus, em diferentes rotações, considerando que determinada atividade pode propiciar a depleção de nutrientes e comprometer, dessa forma, a qualidade química do Cambissolo Húmico.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de estudo

3.1.1 Localização

O estudo foi conduzido no município de Cambará do Sul (Figura 1), onde ocorrem grandes áreas florestadas com a espécie *Pinus taeda* L. O município está localizado na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, no extremo nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (FORTES, 1956), com coordenadas geográficas 29° 02' 52" de latitude Sul e 50° 08' 41" de longitude Oeste de Greenwich e altitude média de 980 m acima do nível do mar, ficando distante 190 km de Porto Alegre, capital do Estado.

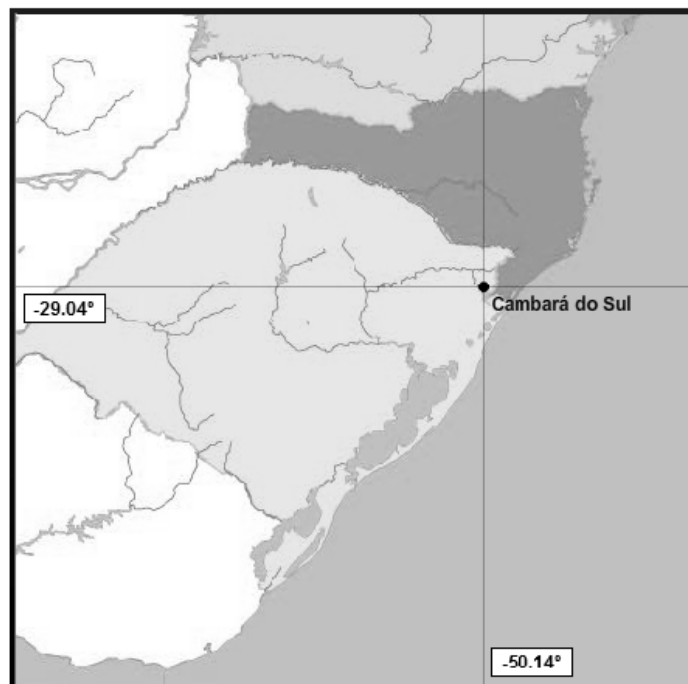


Figura 1 – Localização do município de Cambará do Sul, RS
Fonte: Modificado de IBGE, 2010.

3.1.2 Clima

Na região predominam os ventos alísios que sopram do mar em direção a terra, pela sua proximidade com o litoral norte do estado (MOTA et al., 1971). O

mesmo comportamento é observado devido a ocorrência de cerração, localmente denominada de “viração” (RAMBO, 2005), em que as correntes de ar vindas do oceano encontram-se saturadas de água e perdem parte da sua temperatura, forçando a massa de ar a subir e estabelecer espessos nevoeiros sobre os aparados e os campos situados na região. Esse fenômeno garante a sustentabilidade de um grande número de espécies, visto que a ocorrência de cerração está associada à reposição de muitos nutrientes ao solo.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cfb1, temperado úmido, em que a temperatura mínima média anual é de 10° C e a máxima média anual fica em 21,3° C. A temperatura média anual fica em 14,8° C, a precipitação média anual é de 1787 mm e a umidade relativa do ar em torno de 80% (MORENO, 1961; MALUF, 1999). Em algumas subregiões, as precipitações pluviométricas podem atingir até 2500 mm, não havendo déficits hídricos expressivos em nenhuma época do ano (IBGE, 1986). Desse modo, corroborando com os autores citados anteriormente, Streck et al. (2008) afirmam que os Cambissolos Húmicos ocorrem em ambientes onde a alta pluviosidade e as baixas temperaturas favorecem a acumulação da matéria orgânica e a formação desse tipo de solo na região.

3.1.3 Solo

Na região dos Campos de Cima da Serra, em relevo ondulado a fortemente ondulado, são encontrados os Cambissolos Húmicos Alumínicos organossólicos e os típicos, que podem ocorrer associados aos Neossolos Litólicos (STRECK et al., 2008). Além disso, juntamente com os Cambissolos e Neossolos, torna-se muito comum a ocorrência de afloramentos rochosos na paisagem, devido ao relevo fortemente acidentado.

O tipo de solo predominante nas áreas estudadas é classificado como Cambissolo Húmico Alumínico típico (EMBRAPA, 2006), pertencente à Unidade de mapeamento Bom Jesus, na qual predominam solos pouco profundos ou rasos, com cores bruno escuras a bruno avermelhadas, argilosos, friáveis e com horizonte B incipiente (BRASIL, 1973).

3.1.4 Vegetação natural

Conforme o sistema fisionômico-ecológico de classificação da vegetação mundial estabelecido pela UNESCO e adaptado às condições brasileiras (IBGE, 1992), a vegetação que ocorre naturalmente na região é formada por Floresta Ombrófila Densa Montana, Floresta Ombrófila Mista Montana e Savana Gramíneo-Lenhosa. Nesse caso, esta última vegetação ocorre mais predominantemente na região, a qual foi avaliada no presente trabalho.

As Savanas Gramíneo-Lenhosas estão representadas no bioma Mata Atlântica no sul do Brasil, através de vegetações campestres denominadas Campos de Altitude do Planalto das Araucárias ou Campos de Cima da Serra. Estas áreas predominam em zonas de maior altitude com cotas superiores a 800 m, onde os campos ocupam 1.374.000 hectares entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (BOLDRINI, 2002).

A paisagem dos Campos de Altitude é composta por mosaicos de campos entremeados com a mata de araucária e turfeiras. As araucárias, cobertas por barba-de-pau (*Tillandsia usneoides*), encontram-se junto a coxilhas amareladas pela quantidade de capim-caninha (*Andropogon lateralis*), espécie dominante e característica da área (BOLDRINI et al., 2009). Em geral, apresenta uma vegetação típica de ambientes montano a alto-montano, com estrutura arbustiva e/ou herbácea. Desse modo, a flora campestre é caracterizada por muitos gêneros, dentre os quais, podem-se citar: *Andropogon*, *Aristida*, *Elyonurus*, *Eryanthus*, *Panicum*, *Paspalum*, *Schizachyrium* e *Trachypogon* (LEITE; KLEIN, 1990). Em levantamento realizado por Boldrini et al. (2009) foram contabilizadas as famílias com maior número de representantes na região do Planalto das Araucárias, destacando-se as famílias Asteraceae, Poaceae e Fabaceae.

3.2 Descrições das áreas de estudo

O estudo foi realizado utilizando povoamentos florestais em primeira e segunda rotação de *Pinus taeda* e em campo natural adjacente, este último adotado como testemunha.

3.2.1 Área de primeira rotação

A área de estudo de primeira rotação está localizada na Fazenda Olaria (Figura 2), com coordenadas geográficas de 29°06' de latitude Sul e 50°11' de longitude Oeste, estando distantes 8 km da cidade de Cambará do Sul (RS-020). A fazenda pertence ao Sr. Félix Mauro de Macedo, na qual este exerce a criação de gado de forma extensiva, possuindo também 38,1 ha de florestamento com a espécie *Pinus taeda* em parceria com a empresa Cambará S.A.



Figura 2 – Área de campo natural e, ao fundo, povoamento de *Pinus taeda* na Fazenda Olaria, Cambará do Sul, RS, Brasil

O local da coleta denomina-se Projeto Cambará 37, talhão 01, possuindo 20,13 ha plantados. O povoamento foi implantado desde novembro até dezembro do ano de 1996, utilizando-se mudas produzidas em embalagens plásticas, provenientes de sementes do Clonal Battistella, plantadas em espaçamento 3 m x 2 m, perfazendo um total de 1.666 mudas por hectare. O plantio foi realizado sem adubação, após marcação e coroamento manual. De julho a outubro de 2002 foi realizada a desrama (60% da altura) em 100% das árvores. O primeiro desbaste ocorreu em dezembro de 2006, sendo executado de maneira manual.

No período em que foram realizadas as coletas de solo, o povoamento encontrava-se com 13 anos de idade, apresentando uma serapilheira de acículas com aproximadamente 5 cm de espessura. A coleta de solo também foi feita em área de campo natural adjacente ao povoamento. Nessa área, observou-se o

predomínio de espécies rizomatosas do gênero *Paspalum*, formando um estrato rasteiro recobrendo todo o solo.

3.2.2 Área de segunda rotação

A segunda área de estudo trata-se de uma área de reforma, ou seja, foi implantada onde já havia anteriormente o plantio com *P. taeda* e, portanto, considerada de segunda rotação. Compreende o projeto Cambará 10, localizado na Fazenda Varzinha (Figura 3), com coordenadas geográficas de 28°53' de latitude Sul e 50°07' de longitude Oeste e distante aproximadamente 26 km de Cambará do Sul (RS-020). A fazenda abrange uma área de 803,46 ha e, deste total, 636,14 são florestados com a espécie *P. taeda*.



Figura 3 – Área de campo natural e, ao fundo, povoamento de *Pinus taeda* na Fazenda Varzinha, Cambará do Sul, RS, Brasil

O local da coleta denomina-se Projeto Cambará 10, talhão 07, possuindo 5,36 ha plantados. O povoamento foi implantado de julho a setembro do ano de 1996, utilizando sementes procedentes do Clonal Rigesa e do Clonal Battistella. As mudas foram produzidas em raiz nua e também em embalagens plásticas, as quais foram plantadas em espaçamento 3 m x 2 m, perfazendo um total de 1.666 mudas por hectare. O plantio foi realizado sem adubação, após queima, marcação e coroamento manual.

De junho a dezembro de 2000 foi realizada a desrama (60% da altura) em 100% das árvores e o primeiro desbaste ocorreu no mês de outubro de 2005, sendo realizado manualmente. No período em que foram realizadas as coletas de solo o povoamento encontrava-se com 13 anos de idade, apresentando uma serapilheira de aproximadamente 8 cm de espessura. Nesta fazenda, também avaliou-se uma área de campo natural próximo ao talhão observado. Os parâmetros dendrométricos levantados, que caracterizam ambas as áreas de estudo com plantios de *P. taeda*, podem ser vistos na Tabela 1.

Por se tratar de uma área de reforma, o corte final da primeira rotação foi realizado no ano de 1995 e, também executado de modo manual, de modo que os resíduos foram enleirados na área. Portanto, a partir desse breve histórico, considera-se que a área de segunda rotação vem sendo utilizada com florestamentos de pínus há aproximadamente 30 anos.

Tabela 1 – Dados dendrométricos dos povoamentos de *P. taeda* aos 13 anos de idade em Cambará do Sul, RS, Brasil

Variáveis	Áreas de estudo	
	Fazenda Olaria (1ª rotação)	Fazenda Varzinha (2ª rotação)
DAP médio (cm)	23,4	27,4
Altura média (m)	14,9	21,0
Área basal (m ² ha ⁻¹)	4,6	6,4
Volume c/c (m ³ ha ⁻¹)	371	773,2

DAP: diâmetro à altura do peito; c/c: com casca.

Desse modo, na época anterior ao plantio do pínus, as duas áreas de estudo encontravam-se sob campo natural. Além disso, ambos os povoamentos possuem a mesma idade, porém em ciclos de rotações distintos, favorecendo ainda mais a avaliação da qualidade física e química do solo após a introdução da espécie *P. taeda*, visto que este é considerado um período longo com atividade florestal, e justificando, dessa forma, a escolha dessas áreas.

3.3 Coleta e análises do solo

A coleta das amostras dentro de cada área de estudo foi realizada através da abertura de trincheiras nas entrelinhas dos plantios de 1ª e 2ª rotação (Figuras 4 e 5) e, ainda, nas suas respectivas testemunhas (áreas de campo). Desse modo, foram abertas cinco trincheiras em cada área de estudo, totalizando 20 pontos de coleta. Os pontos de coleta localizaram-se próximos para reduzir a variabilidade do terreno, buscando selecionar perfis homogêneos.



Figura 4 – Croqui de localização das áreas de estudo na Fazenda Olaria (29°06'S; 50°11'W) em Cambará do Sul, RS, Brasil

Fonte: Google Earth, 2010.



Figura 5 – Croqui de localização das áreas de estudo na Fazenda Varzinha (28°53'S; 50°07'W) em Cambará do Sul, RS, Brasil
Fonte: Google Earth, 2010.

Foram coletadas amostras com estrutura alterada e preservada, em trincheiras com 0,60 m de profundidade, nas camadas 0,00-0,05; 0,05-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Para as amostras com estrutura preservada coletaram-se em cada trincheira duplicatas por camada de solo. As amostras foram coletadas no centro de cada camada em cilindros metálicos com 3,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro (Figuras 6a, b, c).



Figura 6 – Coleta de amostras de solo com a estrutura preservada

3.3.1 Análises físicas do solo

As propriedades físicas do solo foram determinadas no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. As análises realizadas foram: granulometria, permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo e de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água.

a) Granulometria

A análise granulométrica foi obtida através da quantificação do teor de argila (fração menor que 0,002 mm), silte (0,002 – 0,05 mm), areia fina (0,05 – 0,20 mm) e areia grossa (fração superior a 0,20 mm) pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). Para isso, foram utilizados 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) e NaOH (6%) como dispersante químico. A caracterização granulométrica das áreas seguiu os grupamentos texturais descritos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

b) Permeabilidade do solo ao ar

As amostras com estrutura preservada foram previamente preparadas e colocadas para saturar durante 24 horas. Após esse período, as amostras foram levadas à coluna de areia para a aplicação das tensões de 1, 6 e 10 kPa, conforme descrito em Reinert; Reichert (2006). As umidades nas respectivas tensões foram medidas através de pesagem em balança. Decorrido o tempo necessário para o equilíbrio da água presente nas amostras em cada tensão, estas foram pesadas e submetidas à determinação da permeabilidade ao ar.

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) foi determinada através da condutividade ao ar (K_l), utilizando o permeômetro de carga constante (Figura 7). Este equipamento atua no sentido de medir o volume de ar que passa pela amostra em litros por minuto. Através de uma válvula de precisão, o fluxo de ar é regulado e medido em um dos fluxímetros. Esta medida é realizada quando o ar que chega à amostra estiver com pressão suficiente para elevar em 1 cm (1 hPa) a coluna de água, descrita na Figura 7. Para a medida da pressão do ambiente, utilizou-se o

valor constante de 1.000 mbar, enquanto que, a temperatura foi medida com termômetro várias vezes durante a análise.

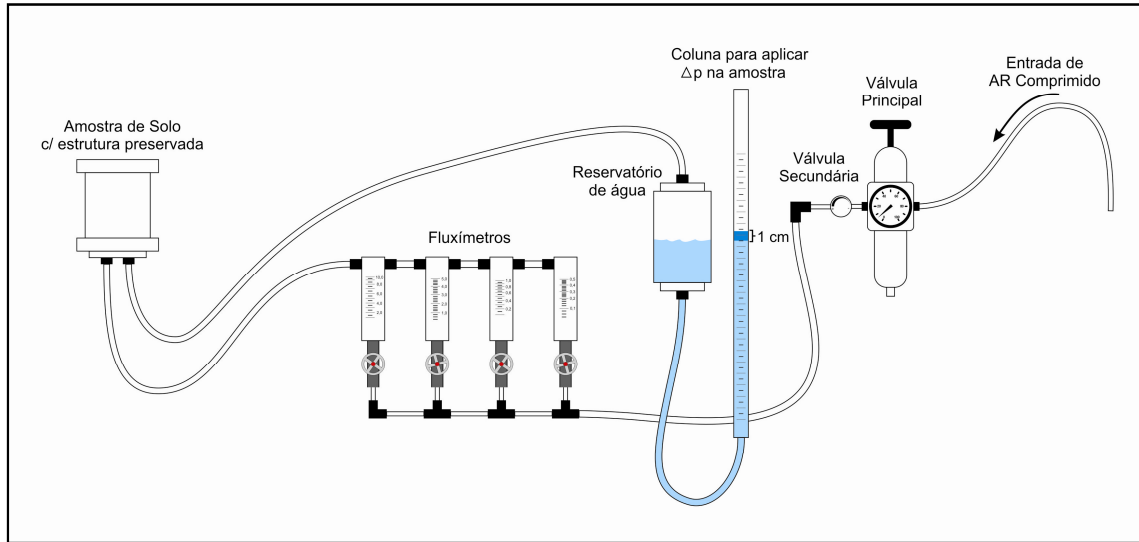


Figura 7 – Permeômetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura de solo preservada

A partir da medida do fluxo de ar ($L \text{ min}^{-1}$) que passa pela amostra, o cálculo da condutividade do solo ao ar é realizado através da seguinte equação:

$$K_l = \rho_l \cdot g \cdot \frac{\Delta V \cdot L}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A}$$

Desse modo, a permeabilidade ao ar (K_a) foi calculada pela condutividade do solo ao ar (K_l):

$$K_a = K_l \cdot \frac{\eta}{\rho_l \cdot g}$$

Onde:

K_l = condutividade ao ar ($m \text{ s}^{-1}$); K_a = permeabilidade ao ar (m^2); ρ_l = densidade do ar na medição ($Kg \text{ m}^{-3}$); g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); ΔV = volume de ar (m^3) que passa pela amostra durante o tempo Δt (s); l = altura da amostra (m); Δp = diferença de pressão entre o ar ambiente e o ar fluindo no

equipamento (Kg m s^{-2}); A = área superficial da amostra de solo (m^2); e η = viscosidade do ar ($\text{Kg s}^{-1} \text{m}$).

c) Condutividade hidráulica do solo saturado

Ao final da análise da permeabilidade do solo ao ar, as amostras com estrutura preservada foram novamente saturadas e determinou-se a condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta s}$) em permeâmetro de carga constante (Figura 8), conforme descrito em Embrapa (1997) e seguindo a equação apresentada abaixo. As três medições do volume de água percolada nas amostras foram feitas a cada cinco minutos, após o início da percolação, visto que as amostras já haviam sido previamente saturadas. Este equipamento permite processar 12 amostras por vez.

$$K_{\theta s} = \frac{Q}{A \cdot t (dH/L)}$$

Onde:

$K_{\theta s}$ = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Q = vazão (m^3); A = área do anel (mm^2); t = tempo de medição (h); dH = carga hidráulica (mm) e L = comprimento da amostra (mm).

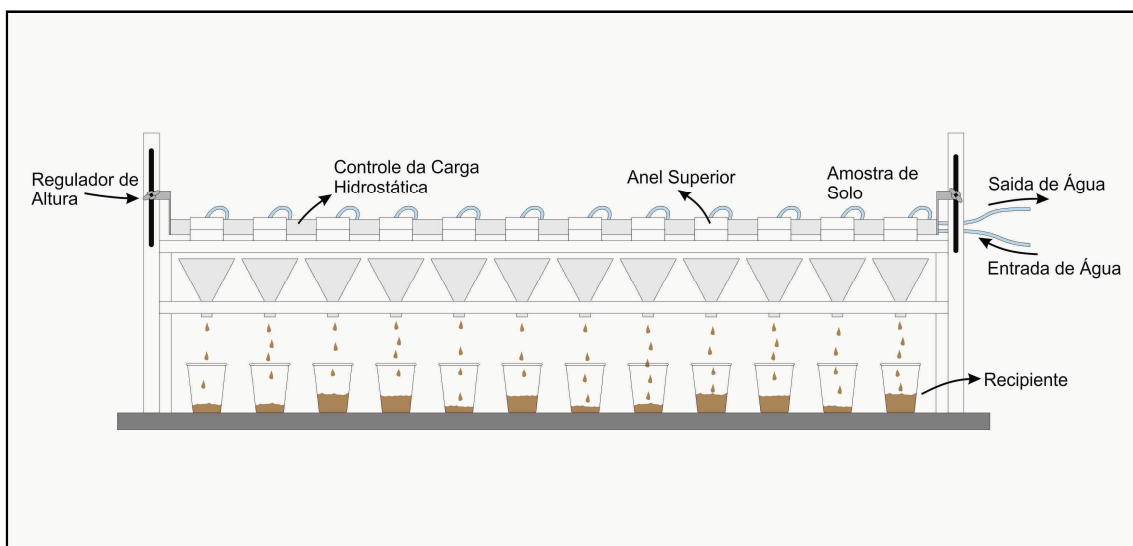


Figura 8 – Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado

d) Densidade do solo e densidade de partículas

Após a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, as amostras foram secas em estufa a 105° C até peso constante. Desse modo, foi possível determinar a densidade do solo (D_s) pelo método do cilindro (EMBRAPA, 1997). Já a densidade de partículas do solo (D_p) foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado, utilizando amostras com estrutura alterada, de acordo com a metodologia proposta por Gubiani et al. (2006), e calculada pela seguinte equação:

$$D_p = \frac{(M_{bs} - M_b)}{[50 - (M_{bsa} - M_{bs})/D_a]}$$

Onde:

D_p = Densidade de partículas do solo (g cm^{-3}); M_b = Massa do balão volumétrico (g); M_{bs} = Massa do balão volumétrico contendo solo (g); M_{bsa} = Massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g) e D_a = Densidade do álcool (g cm^{-3}).

e) Porosidade total, macro e microporosidade

A porosidade total do solo foi obtida pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas, conforme a equação descrita abaixo. Na determinação da microporosidade utilizou-se a coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), na qual a amostra saturada é submetida à tensão de 6 kPa, retirando a água dos macroporos (poros com diâmetros $\geq 0,05$ mm) e restando apenas a água retida no volume de microporos. Logo, a microporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

$$P_t = (1 - D_s/D_p) \cdot 100$$

Onde:

P_t = porosidade total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}) e D_p = densidade de partícula (g cm^{-3}).

f) Distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água

Para a determinação da distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, foram coletadas amostras com estrutura preservada nas camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,20 m. Em laboratório, as amostras foram secas à sombra e destorroadas manualmente, através de seus planos de fraqueza localizados na junção interagregados, de modo que toda a massa de solo atravessasse a peneira com malha de 8,0 mm.

A distribuição do tamanho dos agregados foi obtida pela metodologia modificada de Kemper; Chepil (1965), na qual os agregados são agitados no aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936), em um conjunto de peneiras com malhas de 4,75; 2,00; 1,00 e 0,21 mm em seu interior e, desse modo, separando os agregados em cinco classes de tamanho: 8,00-4,75; 4,75-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,21 mm e < 0,21 mm.

Os resultados foram expressos pela porcentagem de agregados de cada classe (AGR_i) e diâmetro médio geométrico (DMG), calculados através das seguintes equações:

$$AGR_i = mAGR_i / \sum_{i=1}^n AGR_i$$

$$DMG = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (AGR_i \cdot \text{LN}(c_i))}{\sum_{i=1}^n AGR_i} \right]$$

Onde:

AGR_i = agregados obtidos em cada classe (%); $mAGR_i$ = massa de agregados da classe i (menos a massa de areias) (g); $\sum_{i=1}^n AGR_i$ = massa total de agregados (menos areias) (g) e $\text{LN}(c_i)$ = logaritmo natural das classes de diâmetro das peneiras.

3.3.2 Análises químicas do solo

As determinações das propriedades químicas do solo foram realizadas no Laboratório de Análise Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal de

Santa Maria, conforme a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). Foram analisados cálcio, magnésio, fósforo, potássio, pH em água, pH_{SMP}, alumínio trocável, nitrogênio total e carbono orgânico total.

O cálcio e o magnésio foram extraídos em KCl 1M e determinados em Espectrofotômetro de Absorção Atômica. O fósforo e o potássio “disponíveis” foram obtidos pelo extrator Mehlich, sendo as leituras realizadas em Espectrofotômetro de Colorimetria e Fotômetro de Chamas, respectivamente. O pH em água na proporção 1:1 e o pH_{SMP} foram quantificados através de phmetro. O alumínio trocável foi obtido através da titulação de NaOH (0,0116 N) em KCl 1M. O nitrogênio total e o carbono orgânico total foram determinados por oxidação via seca em Analisador Elementar; nesse caso, a divisão dos dois deu origem a relação C/N, e a matéria orgânica foi obtida pela percentagem de carbono orgânico total multiplicada por 1,724.

3.4 Análise estatística dos dados

Na análise estatística, os dados referentes à área de primeira rotação (RT1) foram comparados com a sua testemunha, o campo natural adjacente (CN1). Do mesmo modo, os dados relativos à segunda rotação (RT2) foram comparados com a sua respectiva testemunha (CN2). Para isso, os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk a fim de verificar a normalidade da distribuição. Na ausência de normalidade, os dados foram transformados utilizando-se a transformação Box-Cox. Posteriormente, os dados foram submetidos à comparação de médias pelo teste “t” de Student em 5% de probabilidade de erro. Além disso, para verificar relações entre algumas variáveis, foi realizada complementarmente correlação linear de Pearson.

Para os dados que ainda mantiveram a tendência de não normalidade, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis em 5% de probabilidade de erro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas do solo

4.1.1 Análise granulométrica

Os dados da análise granulométrica (Tabela 2) permitiram verificar que as duas áreas de estudo apresentaram textura homogênea ao longo dos perfis avaliados, com exceção do campo natural adjacente à primeira rotação (camada 0,40 a 0,60 m) com textura muito argilosa. Conforme a classificação textural adotada pela Embrapa (2006), a textura argilosa ocorreu em todas as áreas, indicando a eficácia e homogeneidade na escolha dos pontos amostrados.

Tabela 2 – Areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila do Cambissolo Húmico e, seus respectivos grupos texturais para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Camada (m)	Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)	Classe Textural
	Total	Grossa	Fina			
RT1						
0,00 - 0,05	15,56	10,19	5,37	27,53	56,91	Argilosa
0,05 - 0,20	16,45	10,58	5,88	29,73	53,82	Argilosa
0,20 - 0,40	17,92	12,56	5,37	29,91	52,17	Argilosa
0,40 - 0,60	19,74	13,85	5,90	23,86	56,40	Argilosa
CN1						
0,00 - 0,05	17,94	11,56	6,38	32,21	49,85	Argilosa
0,05 - 0,20	16,17	10,78	5,39	34,24	49,58	Argilosa
0,20 - 0,40	15,64	10,46	5,18	25,48	58,89	Argilosa
0,40 - 0,60	14,28	9,48	4,80	20,84	64,87	Muito argilosa
RT2						
0,00 - 0,05	20,80	12,34	8,46	30,17	49,02	Argilosa
0,05 - 0,20	21,58	13,54	8,03	29,67	48,75	Argilosa
0,20 - 0,40	19,54	12,66	6,88	23,96	56,50	Argilosa
0,40 - 0,60	17,91	11,57	6,34	23,26	58,92	Argilosa
CN2						
0,00 - 0,05	17,50	10,38	7,12	30,80	51,70	Argilosa
0,05 - 0,20	17,00	10,64	6,36	32,94	50,05	Argilosa
0,20 - 0,40	19,24	12,44	6,80	26,29	54,47	Argilosa
0,40 - 0,60	15,54	8,60	6,94	26,84	57,62	Argilosa

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2.

4.1.2 Densidade de partículas e densidade do solo

Os dados de densidade de partículas não apresentaram distribuição normal, e, portanto, foram submetidos à transformação Box-Cox para posterior comparação das médias pelo teste “t”. Já os dados referentes à densidade do solo apresentaram normalidade, portanto não necessitaram de transformação, e foi aplicado diretamente o teste “t”.

Com base nos resultados de densidade de partículas (Tabela 3), diferenças estatísticas não foram observadas nas áreas de estudo. Os valores variaram entre 2,43 e 2,58 g cm⁻³, sendo considerados baixos conforme Costa (2004), que cita valor médio em torno de 2,65 g cm⁻³, referente à densidade dos constituintes minerais predominantes no solo, como quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio coloidais.

Tabela 3 – Densidade de partículas (g cm⁻³) do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Camada (m)	Áreas de estudo			
	RT1	CN1	RT2	CN2
0,00 - 0,05	2,49	2,44	2,43	2,45
0,05 - 0,20	2,44	2,48	2,47	2,51
0,20 - 0,40	2,57	2,57	2,53	2,58
0,40 - 0,60	2,57	2,58	2,58	2,56

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2.

A ausência de diferenças significativas na Dp entre as áreas de estudo avaliadas foi relatada por Brady (1989), o qual afirma que é comum ocorrer este tipo de comportamento porque a densidade de partículas depende em grande parte do material de origem e, portanto, apresenta pouca ou nenhuma diferença para uma mesma classe de solo avaliada, justificando a similaridade e homogeneidade dessa propriedade nas distintas áreas e profundidades avaliadas.

Dessa forma, a conversão do campo natural em povoamentos de *P. taeda* não alterou a densidade de partículas do solo e os valores de Dp apresentaram elevações gradativas com o aumento da profundidade no perfil. Este resultado pode ser atribuído à presença da matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, pois a matéria orgânica apresenta uma menor massa por unidade de volume em relação

às partículas minerais, por ser composta por moléculas grandes e amorfas (KIEHL, 1979; BRADY, 1989; GONÇALVES, 2002). Resultados semelhantes em Cambissolos foram encontrados por Schumacher et al. (2000); Silva et al. (2005b); Marques et al. (2007); Melloni et al. (2008) e Martins (2010).

Como a cobertura geológica predominante na região dos Campos de Cima da Serra é originária de rochas vulcânicas ácidas, tais como o riolito e dacito (STRECK et al., 2008), os solos tenderiam a apresentar teores de SiO₂ entre 45 e 55% e conteúdo de sílica próximos ou acima dos 60% (HORBACH et al., 1986), o que normalmente refletiria em maiores valores de Dp. Além disso, por se tratar de solos em processo de transformação, é natural que mantenham as características do material de origem (TROEH; THOMPSON, 2007), entretanto, pode haver variações decorrentes do teor e das alterações nas propriedades constituintes, como as promovidas pela atuação da matéria orgânica nos valores originais da Dp (MARTINS, 2010). Nesse caso, o carbono orgânico total, no presente trabalho, exerceu influência na densidade de partículas, reduzindo o valor dessa propriedade, como mostra a correlação entre estas variáveis nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis encontradas na primeira área de estudo

Variável	Dp	Ds	Pt	Ma	Mi	Ks	C	DMG
Densidade de partículas	1,00	0,64*	-0,43*	0,01	-0,41*	-0,31	-0,69*	-0,54*
Densidade do solo		1,00	-0,97*	-0,49*	-0,33*	-0,58*	-0,87*	-0,69*
Porosidade total			1,00	0,57*	0,26	0,58*	0,80*	0,64*
Macroporosidade				1,00	-0,64*	0,61*	0,13	0,19
Microporosidade					1,00	-0,17	0,59*	0,37*
Condutividade hidráulica						1,00	0,48*	0,50*
Carbono orgânico total							1,00	0,74*
Diâmetro médio geométrico								1,00

* Correlação entre RT1 x CN1 significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis encontradas na segunda área de estudo

Variável	Dp	Ds	Pt	Ma	Mi	Ks	C	DMG
Densidade de partículas	1,00	0,62*	-0,38*	-0,14	-0,27	-0,40*	-0,68*	-0,49*
Densidade do solo		1,00	-0,96*	-0,71*	-0,08	-0,67*	-0,83*	-0,47*
Porosidade total			1,00	0,79*	0,00	0,66*	0,75*	0,38*
Macroporosidade				1,00	-0,61*	0,66*	0,44*	0,20
Microporosidade					1,00	-0,22	0,25	0,18
Condutividade hidráulica						1,00	0,60*	0,46*
Carbono orgânico total							1,00	0,65*
Diâmetro médio geométrico								1,00

* Correlação entre RT2 x CN2 significativo a 5% de probabilidade.

Na análise estatística, os dados de densidade do solo também não diferiram significativamente entre as áreas de estudo avaliadas (Tabela 6). A primeira área com povoamento de pínus em primeira rotação (RT1) obteve valor mínimo de 0,89 g cm⁻³, na camada 0,00 a 0,05 m, e máximo de 1,21 g cm⁻³, na camada de 0,40 a 0,60 m. Na área com pínus em segunda rotação (RT2), observou-se valor mínimo de 0,84 g cm⁻³ e máximo de 1,08 g cm⁻³ nas mesmas camadas. Esses valores são considerados menores que os limites críticos (1,30 a 1,40 g cm⁻³) propostos por Reichert et al. (2007) para o crescimento das plantas e estabelecidos a partir dos teores de argila.

Como se vê, os povoamentos de pínus não promoveram alterações significativas na densidade do solo, conseguindo manter-se estatisticamente semelhante ao campo natural e, sugerindo por meio desse, a manutenção da qualidade do solo. Observou-se, para as duas áreas de estudo, que os menores valores de Ds foram encontrados na camada superficial, sendo que nas áreas com pínus isso pode estar relacionado ao fato de o solo sofrer pouca intervenção devido aos longos ciclos de rotação e presença de serapilheira, que possibilita a permanência do teor de material orgânico no solo, promovendo a recuperação da estrutura nessa camada. O mesmo foi evidenciado por Balbinot et al. (2003); Cavichiolo et al. (2005); Araújo et al. (2007) e Brun (2008). Todavia, deve-se considerar também, nas duas áreas de estudo, que os baixos valores de Ds já eram esperados, devido à textura do solo ser argilosa, fato relacionado à sua maior agregação e porosidade total.

Tabela 6 – Densidade do solo (Ds), Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta s}$) do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Área	Ds	Pt	Ma	Mi	$K_{\theta s}$
	----- g cm ⁻³ -----	----- cm ³ cm ⁻³ -----	----- cm ³ cm ⁻³ -----	----- mm h ⁻¹ -----	----- mm h ⁻¹ -----
Camada 0,00-0,05 m					
RT1	0,89 a*	0,64 a	0,18 a	0,47 b	272,00 a**
CN1	0,88 a	0,63 a	0,05 b	0,58 a	84,03 b
c.v.	4,10	2,45	29,63	4,39	-
RT2	0,84 a	0,65 a	0,18 a	0,47 b	281,84 a
CN2	0,96 a	0,61 a	0,07 b	0,54 a	38,03 b
c.v.	12,81	7,13	37,79	4,65	-
Camada 0,05-0,20 m					
RT1	1,00 a	0,59 a	0,09 a	0,50 b	169,97 a
CN1	1,00 a	0,60 a	0,05 b	0,54 a	22,73 b
c.v.	5,35	3,05	33,88	4,74	-
RT2	1,04 a	0,58 a	0,09 a	0,49 a	59,77 a
CN2	1,00 a	0,60 a	0,10 a	0,50 a	25,55 a
c.v.	6,37	4,32	42,58	4,73	-
Camada 0,20-0,40 m					
RT1	1,08 a	0,58 a	0,12 a	0,46 b	61,69 a
CN1	1,07 a	0,58 a	0,09 a	0,49 a	1,08 b
c.v.	5,64	4,38	35,61	3,50	-
RT2	1,01 a	0,60 a	0,10 a	0,49 a	45,29 a
CN2	1,08 a	0,58 a	0,12 a	0,46 a	15,34 a
c.v.	7,13	3,91	31,10	5,37	-
Camada 0,40- 0,60 m					
RT1	1,21 a	0,53 a	0,06 a	0,47 b	2,37 a
CN1	1,15 a	0,55 a	0,05 a	0,50 a	0,07 b
c.v.	3,30	3,17	42,87	3,28	-
RT2	1,08 a	0,58 a	0,10 a	0,48 a	7,61 a
CN2	1,14 a	0,56 a	0,06 a	0,49 a	2,54 a
c.v.	6,10	4,59	41,87	3,86	-

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2; c.v. = coeficiente de variação. *Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de t em 5% de probabilidade de erro; **Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis em 5% de probabilidade de erro.

Observaram-se, ainda, aumentos proporcionais da densidade do solo com a profundidade, demonstrando que em condições naturais, a densidade do solo tende a apresentar este comportamento, sendo atribuídos a este aumento a diminuição do teor da matéria orgânica e o adensamento natural proporcionado pelas camadas sobrejacentes (KIEHL, 1979; CAVENAGE et al., 1999; BRUN, 2008; MORALES et al., 2010). Verifica-se, enfim, que a elevação da densidade do solo ocorre conjuntamente com a redução da porosidade total, as quais se mostraram altamente correlacionadas (Tabelas 4 e 5).

Em estudo relacionando à influência das propriedades físico-hídricas de um Cambissolo Húmico Alumínico típico com o crescimento do *P. taeda*, aos 13 e 14 anos de idade, Bognola et al. (2010) observaram valores de densidade do solo semelhantes ao presente trabalho. Outros estudos também demonstraram resultados similares, em que os menores valores foram encontrados na camada de 0 a 10 cm, devido à manutenção da matéria orgânica (RIGATTO et al., 2005), semelhante também ao observado por Morales et al. (2010), em povoamentos de *P. taeda* em terceira rotação, na camada de 0 a 20 cm. Neste último trabalho, os autores atribuíram a menor D_s nas camadas superficiais ao efeito direto da baixa densidade da matéria orgânica, e ao efeito indireto da maior agregação proporcionada pela mesma.

4.1.3 Porosidade total, macro e microporosidade

Os dados de porosidade total, macro e microporosidade apresentaram distribuição normal, sendo aplicada diretamente a comparação pelo teste “t”.

A partir dos valores apresentados na Tabela 6, verifica-se que, na primeira área de estudo, a porosidade total não diferiu estatisticamente entre o povoamento de pínus em primeira rotação e o campo natural adjacente. O mesmo foi verificado pelos os autores Bellote; Dedecek (2006) que, comparando os atributos físicos de Latossolos Vermelhos e Cambissolos Háplicos, em povoamentos de *P. taeda* com 20 anos de idade, também não observaram diferença significativa na porosidade total entre os sítios avaliados.

A porosidade total apresentou valores que variaram de 0,53 a 0,64 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e de 0,55 a 0,63 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 6), para áreas com pínus e campo, respectivamente; estando dentro dos valores comumente encontrados em solos

argilosos (0,40 a 0,65 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) citados por Prevedello (1996). Nota-se que a variação foi pequena para ambos os usos, sendo que os valores compreendidos nesses intervalos foram muito semelhantes, fato que pode estar relacionado à homogeneidade do teor de argila nas camadas avaliadas, pois o volume e o tamanho dos poros do solo são altamente dependentes da sua textura (DEDECEK, 2008). Baver et al. (1972) complementam afirmando que a argila e a matéria orgânica apresentam porosidades maiores e, assim, este atributo irá variar de acordo com o tamanho das partículas e o estado de agregação do solo.

A macroporosidade na área com povoamento de pínus foi significativamente maior até a camada de 0,20 m (Tabela 6). Na camada superficial (0,00 a 0,05 m), os valores encontrados foram de 0,18 e 0,05 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para povoamento de pínus e campo, respectivamente. Já na camada 0,05 a 0,20 m, os valores de macroporos foram de 0,09 e 0,05 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os respectivos usos. Nesse caso, observa-se que alguns valores referentes à macroporosidade, principalmente na área de campo, estiveram abaixo das condições ideais para a oxigenação do solo, isto é, 0,10 a 0,16 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, como é citado por Baver et al. (1972).

Quanto à microporosidade, observou-se diferença estatística em todas as camadas avaliadas (Tabela 6), sendo os maiores valores encontrados na área de campo. Nesse caso, a ocorrência de microporos em grandes proporções, poderá dificultar o movimento de água ao longo do perfil, diminuindo a drenagem interna do solo comandada pela estrutura (CAVENAGE et al., 1999). Todavia, os resultados referentes ao comportamento da permeabilidade do solo serão discutidos a seguir. De modo geral, os valores de microporosidade foram altos e variaram de 0,46 a 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e 0,49 a 0,58 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, nas áreas de pínus e campo, respectivamente (Tabela 6). Considerando apenas as camadas superficiais, Bertol et al. (2004) também verificaram uma pequena variação no volume de microporos em relação à variação ocorrida no volume de macroporos, observada entre sistemas de manejo e cultivo de culturas em Cambissolo Húmico Alumínico léptico.

A maior macroporosidade do solo encontrada nas camadas superficiais do povoamento de pínus em primeira rotação pode estar relacionada à ocorrência de sistemas radiculares lignificados e possíveis canais (bioporos) resultantes da decomposição e renovação dessas raízes na superfície do solo (Apêndice A), além da atividade biológica da mesofauna. Também devem ser considerados conjuntamente os elevados teores de carbono orgânico, os acúmulos de materiais e

a alta agregação proporcionada a essas camadas superiores. Nesse contexto, Araújo et al. (2007) afirmam que mesmo com o povoamento de pinus apresentando menor biomassa microbiana e respiração basal em relação a diferentes usos, existe uma alta correlação entre a MO e a atividade de micro-organismos no solo, o que comprova a forte atuação destes em solos sob cobertura florestal, principalmente nas camadas superficiais. Com relação à presença de bioporos no solo, em consonância com o retratado anteriormente, ressalva-se a importância destes no ambiente edáfico, pois sua redução pode diminuir a condutividade hidráulica dos solos saturados, sendo imprescindível sua manutenção no solo (CURMI et al., 1994).

Gonçalves (2002) esclarece que o processo de estruturação do solo ocorre em duas fases: a primeira estaria relacionada à aproximação das partículas primárias e a segunda, ao afastamento mecânico de fragmentos da massa de solo em macroagregados, entre os quais estariam situados os macroporos. Partindo desse pressuposto, o autor afirma que qualquer ação que desenvolva linhas de enfraquecimento, como os ciclos de umedecimento e secagem, o crescimento das raízes e a atividade da fauna edáfica (Apêndice B), intensifica o processo de agregação e, conseqüentemente, aumenta a porosidade no solo.

Nesse sentido, ao avaliar as condições da macroporosidade de um Latossolo sob diferentes culturas, verificou-se que o *P. caribaea* var. *hondurensis* e a mata ciliar foram os usos mais promissores na recuperação das qualidades dessa propriedade, visto que em todas as camadas avaliadas os maiores valores de macroporos foram encontrados na área com plantio de pinus (CAVENAGE et al., 1999). Gavande (1976) corrobora afirmando que solos com uma quantidade apreciável de agregados relativamente estáveis, de tamanho moderado (1 a 5 mm de diâmetro), em geral, teriam poros grandes o suficiente para uma adequada aeração. Porém, ressalva-se que a ocorrência de reduções da macroporosidade e aumento da microporosidade devido a compactação do pastejo bovino favorece o aumento da estabilidade de agregados de baixa qualidade. Nesse caso, agregados de elevado DMG nem sempre apresentam adequada distribuição de poros internos, o que implica a qualidade estrutural do solo (BERTOL; SANTOS, 1995).

Na segunda área de estudo, a porosidade total também não teve diferença estatística, apresentando valores que variaram entre 0,58 e 0,65 cm³ cm⁻³ e 0,56 e 0,61 cm³ cm⁻³ (Tabela 6), em áreas com pinus em segunda rotação e campo natural,

respectivamente; estando adequados aos valores citados anteriormente por Prevedello (1996). Resultados semelhantes foram encontrados analisando-se diferentes sítios com povoamentos de *P. taeda* em terceira rotação, em que foram observados valores médios de porosidade total oscilando entre 0,42 e 0,60 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (MORALES et al., 2010).

A macroporosidade se diferenciou estatisticamente apenas na camada de 0,00 a 0,05 m (Tabela 6), a qual se mostrou maior na área de pínus em relação ao campo, apresentando valores médios de 0,18 e 0,07 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, nas respectivas áreas avaliadas, sendo que a macroporosidade da área de campo novamente foi considerada abaixo do intervalo ideal sugerido por Baver et al. (1972). Esse resultado está relacionado ao manejo praticado na área, tal como a queima e o corte raso, os quais podem ser responsáveis pela perda de MO no solo. Dessa forma, a segunda rotação promoveu a formação da matéria orgânica apenas na camada mais superficial, pois o efeito da cobertura florestal, após perturbações dessa natureza, necessitaria de um período maior para promover a incorporação de MO ao longo do perfil. Andrae (1978) destaca que a substância orgânica, quando queimada, não sofre transformação e incorporação biológica, desfavorecendo o efeito benéfico secundário da matéria orgânica sobre a estrutura do solo.

O mesmo comportamento foi observado para a microporosidade, a qual apresentou diferença significativa somente na camada de 0,00 a 0,05 mm (Tabela 4), onde os valores foram de 0,47 e 0,54 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as áreas de pínus e campo, respectivamente. Nas demais camadas, os valores não diferiram estatisticamente, demonstrando que a área com pínus em segunda rotação apresentou volume de microporos similares aos das condições naturais do solo.

De acordo com os resultados, pode-se constatar ainda que os valores de porosidade total foram inversamente associados aos de densidade do solo, fato já evidenciado anteriormente através da alta correlação negativa entre essas variáveis (Tabelas 4 e 5). A relação inversa da porosidade total com relação à densidade do solo ocorre devido à forma laminar das argilas e ao aumento do seu teor (Tabela 2), apresentando uma tendência a se ajustarem face a face, diminuindo os espaços vazios (REICHERT et al., 2007). Esse fato foi evidenciado por Rigatto et al. (2005), os quais associaram os maiores valores de porosidade total, na profundidade de 0 a 10 cm, aos menores resultados de densidade do solo nesta camada. Os mesmos autores verificaram aumentos nas quantidades de macroporos e nos teores de

material orgânico nessa profundidade, semelhante ao verificado no presente trabalho.

Em suma, a substituição do campo natural por povoamento de pinus não alterou a porosidade total do Cambissolo Húmico, no entanto, proporcionou aumentos na macroporosidade, fundamentalmente nas camadas mais superficiais, favorecendo a estruturação dessas camadas. Nesse caso, possivelmente a segunda rotação teria o mesmo comportamento quanto à macroporosidade, se não fosse o manejo aplicado anteriormente na área. A microporosidade esteve associada inversamente à macroporosidade, sendo geralmente maior na área de campo.

4.1.4 Condutividade hidráulica do solo saturado

Os dados de condutividade hidráulica do solo saturado não apresentaram distribuição normal, comportamento considerado comum. Assim, os dados foram submetidos à transformação Box-Cox, entretanto, o presente trabalho não obteve êxito na normalização dos mesmos, sendo necessária a aplicação do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

Conforme os resultados da condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 6), na primeira área de estudo, o povoamento de *P. taeda* em primeira rotação apresentou valores de K_{θ_s} estatisticamente maiores em relação à área de campo, em todas as camadas avaliadas. Os valores de K_{θ_s} mantiveram-se elevados principalmente nas camadas mais superficiais amostradas (0,0 a 0,05 m e 0,05 a 0,20 m), correspondendo aos valores de 272,00 e 169,97 mm h⁻¹, respectivamente. Os mesmos valores são classificados como tendo permeabilidade rápida, e moderada a rápida (SOIL SURVEY STAFF, 1993).

Na segunda área de estudo, o povoamento de *P. taeda* em segunda rotação apresentou valores de K_{θ_s} estatisticamente superiores apenas na camada de 0,0 a 0,05 m (Tabela 6), em relação à área de campo. Nessa camada, a permeabilidade foi classificada como rápida pela Soil Survey Staff (1993), apresentando média mais elevada do que a área de primeira rotação. Entretanto, observa-se que esse valor diminui abruptamente na camada seguinte, de forma similar à porosidade do solo, como já retratado anteriormente. Nota-se ainda que ambas as áreas de estudo apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, houve redução da K_{θ_s} à medida que aumentou a profundidade do perfil; o mesmo tem sido evidenciado por Silva et al. (2008b) e Dalbianco (2009).

Os elevados valores da $K_{\theta s}$ encontrados nas camadas superficiais, na área com pínus em primeira rotação, podem estar relacionados ao maior volume de macroporos encontrados até a camada de 0,20 m (Tabela 6). Considerando que o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos, é comum que ocorra correlação entre essas variáveis (Tabelas 4 e 5), já que são provenientes do mesmo espaço poroso (MESQUITA; MORAES, 2004). Deve-se considerar ainda que a presença de “megaporos” é mais comum nas camadas superficiais, e seus efeitos podem não influenciar tão acentuadamente nos resultados de macroporosidade, contudo, afetarão bastante os valores de condutividade, visto que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (Lei de Poiseuille) e, por essas razões, é comum obter valores altos de $K_{\theta s}$ nesta camada (REICHERT et al., 2007).

Em face disso, os altos valores de $K_{\theta s}$ encontrados nas camadas superficiais refletem o efeito benéfico da cobertura florestal nesse atributo. Além disso, os longos períodos de rotação, sem interferência do manejo na área, são capazes de recuperar e manter o espaço poroso que havia sido modificado nas operações de implantação e, dessa maneira, proporcionar aumentos da $K_{\theta s}$. Esse resultado é justificado pelo fato da $K_{\theta s}$ ser determinada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, sendo dependente da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos (MESQUITA; MORAES, 2004) e, ainda, por demonstrar íntima relação com a estabilidade de agregados (GAVANDE, 1976), fornecendo indiretamente as condições estruturais do solo. Corroborando com o exposto, foram encontrados, em Latossolo Vermelho, altos valores de $K_{\theta s}$ nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo, devido à continuidade dos poros e a maior atividade biológica (SOUZA; ALVES, 2003).

O fato da condutividade hidráulica se diferenciar apenas na camada de 0,0 a 0,05 m, na área com pínus em segunda rotação, pode também estar relacionado à elevada presença de macroporos nessa camada (Tabela 6), bem como, ao baixo volume de microporos em relação à área de campo. A brusca redução da $K_{\theta s}$ esteve acompanhada da não diferenciação da macro e microporosidade entre as áreas, juntamente com a alta redução da estabilidade de agregados. No entanto, mesmo que nas demais camadas subsuperficiais a área com pínus não tenha diferido estatisticamente da área de campo, observa-se que a mesma obteve sempre os maiores valores absolutos de $K_{\theta s}$ ao longo do perfil.

A redução da $K_{\theta s}$ com o aumento em profundidade foi observada nas duas áreas de estudo avaliadas (Tabela 6), resultado que deve-se possivelmente à redução da MO, Pt, Ma e da estabilidade de agregados, bem como, do aumento proporcional da Ds em profundidade, as quais encontram-se altamente correlacionadas com a $K_{\theta s}$ (Tabelas 4 e 5). Nesse caso, considera-se que essas alterações contribuem para que ocorram decréscimos do diâmetro dos poros, reduzindo, assim, o fluxo de água ao longo do perfil (REICHERT et al., 2007). Além disso, em solos mais jovens, onde há o predomínio de argilas silicatadas, a estrutura tende a ser maior devido à forma de placas ou lâminas com tendência a se ajustarem face a face, aumentando a coesão entre as placas, formando unidades estruturais grandes e de baixa permeabilidade (GONÇALVES, 2002). Em profundidade, esse efeito torna-se mais acentuado, devido ao aumento proporcional da fração argila, reduzindo a condutividade de água no solo.

De acordo com os resultados, é possível inferir que a conversão do campo natural em povoamento de *P. taeda* promoveu maior condutividade hidráulica ao Cambissolo Húmico e, sobretudo, sugerir que a atuação do pínus sobre esse atributo é mais acentuada nas camadas superficiais, devido ao efeito benéfico que a mesma proporciona à estruturação do solo.

4.1.5 Permeabilidade do solo ao ar

Os dados de permeabilidade do solo ao ar referentes à tensão de 1 kPa não apresentaram distribuição normal, portanto foram submetidos à transformação Box-Cox, com a qual não se obteve êxito na normalização, sendo necessário aplicar o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Nas tensões de 6 e 10 kPa, os dados de permeabilidade da primeira área de estudo apresentaram distribuição normal, sendo aplicada diretamente a comparação de médias pelo teste “t”. No entanto, os dados da segunda área de estudo não tiveram o mesmo comportamento e, por isso, foram submetidos à transformação Box-Cox e à posterior comparação de médias.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7, observa-se, na primeira área de estudo, diferença significativa somente nas tensões de 6 e 10 kPa, até a profundidade de 0,20 m. Nesse caso, a área com pínus em primeira rotação apresentou maior permeabilidade em relação ao campo natural. Por outro lado, a segunda área de estudo teve diferença estatística apenas na tensão de 6 kPa, na

camada de 0,05 a 0,20m. Essa similaridade estatística evidenciada no presente trabalho pode estar relacionada ao reduzido número de amostras e à alta variabilidade dos dados, favorecendo a não diferenciação entre as áreas estudadas.

Tabela 7 – Permeabilidade do solo ao ar (Ka) nas tensões 1, 6 e 10 kPa do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Área	Ka _{1kPa}	Ka _{6kPa}	Ka _{10kPa}
	----- μm ² -----		
Camada 0,00-0,05 m			
RT1	23,81 a*	47,24 a**	60,00 a**
CN1	7,88 a	27,52 b	35,34 b
c.v.	-	29,95	27,61
RT2	13,87 a	46,69 a	57,99 a
CN2	8,02 a	22,64 a	24,06 a
c.v.	-	22,92	18,47
Camada 0,05-0,20 m			
RT1	11,90 a	35,12 a	55,19 a
CN1	5,24 a	7,86 b	18,21 b
c.v.	-	34,33	61,52
RT2	6,29 a	33,43 a	46,67 a
CN2	2,59 a	16,68 b	23,47 a
c.v.	-	14,02	18,02
Camada 0,20-0,40 m			
RT1	3,93 a	32,49 a	48,11 a
CN1	4,06 a	18,85 a	28,95 a
c.v.	-	58,59	72,79
RT2	4,26 a	20,60 a	26,43 a
CN2	2,18 a	24,48 a	34,85 a
c.v.	-	25,39	28,32
Camada 0,40- 0,60 m			
RT1	3,84 a	26,49 a	44,57 a
CN1	1,89 a	14,06 a	21,52 a
c.v.	-	74,34	77,23
RT2	4,45 a	13,75 a	17,34 a
CN2	1,33 a	10,69 a	21,92 a
c.v.	-	27,71	25,79

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2; c.v. = coeficiente de variação. Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis em 5% de probabilidade de erro; Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste t em 5% de probabilidade de erro.

Na primeira área de estudo, a Ka manteve-se estatisticamente superior no povoamento de pínus em primeira rotação, até a camada de 0,20m, o que pode

estar associado à elevada macroporosidade e à baixa microporosidade nestas camadas (Tabela 6). Observa-se, ainda, que apesar da não diferenciação estatística nas demais camadas, a permeabilidade no plantio de pínus demonstrou o mesmo comportamento que a condutividade hidráulica do solo saturado, ou seja, apresentou valores absolutos maiores do que o campo natural ao longo de todo o perfil.

Alguns estudos têm definido a permeabilidade do solo ao ar como dependente da estrutura do solo (IVERSEN et al., 2001; TULI et al., 2005; SILVA et al., 2009), influenciada pela porosidade total, distribuição e geometria do sistema poroso, tortuosidade, conectividade e constrição (MOLDRUP et al., 2003; DORNER; HORN, 2009). Além disso, a K_a é condicionada principalmente em relação ao tamanho e continuidade dos macroporos, considerados até mesmo mais importantes do que a quantidade de poros na determinação do fluxo de ar (BALL et al., 1988) e, portanto, sendo comum apresentar-se elevada nas camadas mais superficiais.

Diante disso, é possível inferir que a área com pínus em primeira rotação proporcionou ao solo condições para obter poros com diâmetros maiores e contínuos, devido aos longos períodos sem interferência do manejo na área e deposição de material orgânico, o qual favorece a agregação do solo, deixando, assim, poros interagregados mais abertos para o fluxo de ar (LAURÉN et al., 2000). É provável ainda que, nessas camadas, ocorram caminhos de fluxos preferenciais devido à presença de raízes lignificadas e da atividade da fauna edáfica (SILVA et al., 2009), intensificando a quantidade de poros com diâmetros maiores advindos da atividade biológica.

Avaliando a permeabilidade do solo ao ar em um sítio com *P. sylvestris*, foi encontrado maior K_a na camada húmica da floresta de pínus, quando comparado com solos minerais e turfas. Nesse caso, a alta permeabilidade foi justificada através do elevado volume e continuidade dos macroporos, proporcionados pelo material fracamente decomposto nessa camada (LAURÉN, 1997). O autor observou que a elevada K_a e a continuidade dos poros permitiram um fluxo de ar eficaz, bem como a infiltração de água na camada húmica.

Na segunda área de estudo, com exceção da tensão de 6 kPa, na camada de 0,05 a 0,20m, o povoamento de pínus em segunda rotação e o campo natural não diferiram significativamente. Todavia, observa-se que o povoamento de pínus apresentou K_a mais elevada do que o campo natural até a profundidade de 0,20 m. Esse resultado pode estar sendo influenciado pela elevada M_a e baixa M_i presente

apenas na camada mais superficial (0,0 a 0,05 m), pois nas demais, não ocorreram diferenças significativas. Além disso, a K_a depende da estrutura e do estado de agregação do solo (TULI et al., 2005), sendo que esse último, foi reduzido bruscamente na camada seguinte. Nesse caso, o povoamento de pinus conseguiu promover maior estruturação apenas na camada superficial, visto que, na camada de 0,05 a 0,20 m, o campo manteve valor maior de carbono orgânico total. Isso possivelmente esteja relacionado à queima ocorrida antes da implantação do povoamento e à extração da madeira pelo corte raso, os quais podem ter influenciado na redução da K_a .

Nesse sentido, estudando a permeabilidade do solo ao ar sob floresta nativa e de coníferas (áreas com e sem queima), foi encontrada maior K_a nas áreas de floresta nativa que não sofreram queimadas. Esse resultado foi atribuído à desagregação do solo e redução dos macroporos, em função da combustão da matéria orgânica. Houve também, na floresta de coníferas, aumentos significativos na densidade do solo e diminuição significativa da porosidade, como resultado da queima (CHIEF et al., 2008).

De modo geral, a permeabilidade do solo ao ar aumentou com a tensão aplicada, visto que a K_a é inversamente relacionada ao teor de água do solo. Portanto, o valor da permeabilidade se elevou devido à redução do teor de água da amostra de solo, fato que pode estar associado ao maior volume de poros e à formação de caminhos preferenciais para o fluxo de ar à medida que os poros de tamanho menores foram sendo progressivamente drenados (SILVA et al., 2009). Enfim, o máximo valor de permeabilidade é alcançado quando o solo é seco, diminuindo com o umedecimento deste até valores próximos a zero, quando ocorre a saturação (BALL; SCHJØNNING, 2002).

Nota-se ainda, de modo geral, que em cada tensão aplicada houve tendência de redução da permeabilidade com o aumento da profundidade. Esse fato pode estar relacionado ao aumento da D_s e redução da P_t , mesmo que essas não tenham se diferenciado significativamente, como visto anteriormente. Esse resultado corrobora com Silva et al. (2009), os quais consideram que a permeabilidade depende basicamente de dois fatores, do conteúdo de água e da densidade do solo, pois ambos influenciam a geometria e a continuidade do sistema poroso. Além disso, esse comportamento vem acompanhado da redução do carbono orgânico

total, proporcionando um desfavorecimento na estruturação e agregação do solo e, assim, influenciando na redução da aeração (TULI et al., 2005).

No que tange ao fato de a permeabilidade do solo ao ar apresentar-se de forma semelhante à condutividade hidráulica do solo saturado, este pode ser explicado pela relação que as duas possuem com o espaço poroso do solo. Desse modo, quando a permeabilidade é medida próximo a capacidade de campo (potenciais mátricos entre -5 e -10 kPa), o fluxo de ar ocorrerá nos poros com diâmetros maiores e, por fim, a permeabilidade poderá retratar o comportamento da K_{es} , sendo utilizada na sua estimativa (IVERSEN et al., 2001).

4.1.6 Distribuição do tamanho dos agregados

Os dados de estabilidade de agregados, representados pela porcentagem de agregados em cada classe de tamanho e diâmetro médio geométrico (DMG) não apresentaram distribuição normal e, por conseguinte, foram submetidos à transformação Box-Cox para posterior comparação de médias pelo teste “t”.

Na primeira área de estudo, comparando a área de plantio de *P. taeda* em primeira rotação com o campo natural, na camada de 0,00 a 0,05 m, os valores de distribuição do tamanho dos agregados formados não diferiram estatisticamente entre os usos do solo (Figura 9), pois somente na classe de tamanho <0,21 mm houve diferença significativa. No entanto, observou-se valores elevados de agregados estáveis pertencentes as primeiras classes (8,00 a 4,75 e 4,75 a 2,00 mm). Nestas, as médias na área com plantio de pínus foram de 47,45 e 29,00%, respectivamente, demonstrando alta estabilidade de agregados com diâmetros maiores na camada superior do solo. O mesmo comportamento foi observado por Longo et al. (1999), em que a maior parte dos agregados ficou retida na peneira de 4,0 mm, indicando a formação de agregados bastante estáveis em água.

A partir da figura 9, observa-se na camada mais superficial do solo (0,00 a 0,05 m), que a área com plantio de pínus em primeira rotação manteve o mesmo comportamento da área de campo natural quanto ao percentual de agregados estáveis, bem como em relação à distribuição nas diferentes classes de tamanhos de agregados. Devido ao fato de o material orgânico permanecer acumulado na superfície do solo, é natural que ambas as áreas apresentem altos percentuais de agregados com diâmetros maiores e, conseqüentemente, mais estáveis. Ainda que

o campo apresentasse maior teor de MO nessa camada, a área com pínus conseguiu promover agregação de forma similar. Lima et al. (2003) perceberam que em todas as camadas avaliadas houve correlação altamente significativa entre os teores de carbono orgânico e diâmetro médio ponderado, principalmente na camada de 0 a 2,5 cm, semelhante ao presente trabalho, como pode ser observado nas Tabelas 4 e 5.

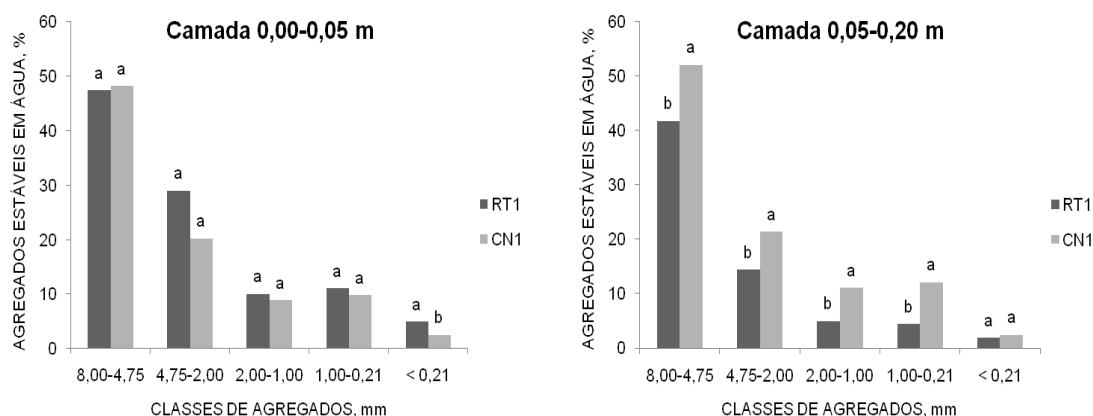


Figura 9 – Agregados estáveis em água em diferentes classes de agregados do Cambissolo Húmico, considerando a área de primeira rotação (RT1) e campo natural adjacente (CN1) nas diferentes camadas, Cambará do Sul, RS, Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada classe, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro.

Considerando a segunda camada avaliada, de 0,05 a 0,20 m, a área com plantio de *P. taeda* se diferenciou estatisticamente do campo em todas as classes de agregados (Figura 9), com exceção da classe < 0,21 mm. Observa-se, nessa mesma área, que os valores de estabilidade de agregados foram mais baixos em relação a sua testemunha (área de campo), apresentando valores médios de 41,81 e 14,39% para as classes de 8,00 a 4,75 mm e 4,75 a 2,00 mm, respectivamente. O percentual dos agregados menores ficou entre 4,98 e 4,37%, para as classes 2,00 a 1,00 e 1,00 a 0,21 mm.

Por outro lado, em todas as classes de tamanho, o campo natural manteve os percentuais de agregados estáveis, semelhantes à camada superior, apresentando, inclusive, valores médios mais elevados. Esse resultado revelou o potencial do campo em manter a estabilidade dos agregados até mesmo nas camadas inferiores. Os valores variaram entre 52,12 e 21,44% para as classes de 8,00 a 4,75 mm e 4,75 a 2,00 mm, respectivamente. O percentual dos agregados menores ficou entre 11,12 e 12,14%, para as classes 2,00 a 1,00 e 1,00 a 0,21 mm.

Além disso, nas duas camadas avaliadas, a área com plantio de pinus apresentou tendência de diminuição da estabilidade de agregados com o aumento da profundidade, em consonância com os resultados encontrados em Lima et al. (2003), Wendling et al. (2005) e Morales et al. (2010). Tais valores estariam também relacionados à diminuição dos níveis de carbono orgânico com o aumento da profundidade do solo.

Por se tratar de um Cambissolo de caráter húmico, este apresenta elevados teores de material orgânico e carbono orgânico acumulado no horizonte superficial, fato relacionado às baixas temperaturas e elevada acidez do solo (baixo pH), inibindo a atividade de micro-organismos decompositores. Segundo Tisdall; Oades (1982), a matéria orgânica do solo é um dos principais agentes de formação e estabilização dos agregados, pois polímeros orgânicos ligam-se às superfícies inorgânicas através de cátions polivalentes e polímeros hidroximetálicos. Para Gonçalves (2002), a matéria orgânica atua de forma direta e indireta no processo de agregação do solo, seja pelas suas características e propriedades intrínsecas ou pela alteração do meio, como observado por Morales et al. (2010).

Nesse sentido, em consonância com Gonçalves (2002), os autores Baver et al. (1972) afirmam que somente material orgânico sem transformação biológica não promove efeito na estrutura do solo. Nesse caso, é necessária a contribuição de fungos e bactérias para a formação e estabilização intra e interagregados, por meio da excreção de polissacarídeos, formação de húmus, ou através do envolvimento das partículas primárias e agregados pelas hifas dos fungos (OADES, 1993). Wohlenberg et al. (2004) complementam afirmando que a própria matéria orgânica serve como fonte de energia para os micro-organismos atuarem na agregação do solo.

Considera-se ainda que a quantidade de material orgânico existente sobre o solo é consequência da massa aportada e de sua velocidade de decomposição. Em trabalho envolvendo serapilheira de áreas com floresta secundária e com *Mimosa caesalpinaefolia*, perceberam-se maiores teores de suberina e polifenóis nas mesmas, reduzindo a decomposição dos resíduos no solo e favorecendo o acúmulo de material orgânico, contribuindo com o aumento do diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados (BOCHNER et al., 2008). Wohlenberg et al. (2004) também ressaltaram a importância da matéria

orgânica como agente de agregação das partículas do solo, aumentando o DMG, o índice de estabilidade e a porcentagem dos agregados maiores.

Inúmeros trabalhos já demonstraram que a preservação ou o aumento do material orgânico são um dos principais fatores responsáveis pela estabilização dos agregados. Nesse sentido, comparando sistema de plantio direto com mata natural, em Cambissolo Háplico, observou-se melhor agregação em mata natural. Tal resultado foi justificado pelos maiores teores de carbono orgânico e forte influência da atividade biológica (LUCIANO et al., 2010); mesmo comportamento foi evidenciado em Lima et al. (2003); Wendling et al. (2005) e Neves et al. (2007).

Outro aspecto relevante relacionado ao solo do presente trabalho é a presença de altos teores de alumínio trocável nas áreas com plantio de pinus em relação ao campo (Tabela 8), visto que os mesmos podem interagir formando complexos organominerais e, dessa forma, estar atuando na estabilização dos agregados. Em trabalho realizado por Reichert et al. (1993) foi encontrada correlação positiva entre os teores de Al extraído com HCl e índices de agregação, o que é explicado pelo fato de os óxidos de alumínio formarem interestratificações com minerais de argila e agirem como material cimentante, agregando as partículas do solo.

Em estudo que avaliou as características do solo na estabilidade dos agregados foi encontrado efeito do teor de alumínio em relação à agregação do solo, porém insuficiente para explicar as variações no DMP (SILVA; MIELNICZUK, 1998). Observou-se, em Cambissolo Húmico, que, após revolvimento do solo e aplicação de calcário, houve prejuízos à qualidade do solo, com redução da estabilidade de agregados e conteúdo de carbono (COSTA et al., 2006), reafirmando a dependência ao ambiente natural desse tipo de solo para a manutenção das condições da qualidade estrutural.

Na segunda área de estudo, comparando a área florestada com *P. taeda* em segunda rotação com o campo natural, na camada de 0,00 a 0,05 m, os valores de distribuição do tamanho dos agregados formados não diferiram estatisticamente (Figura 10), o que pode estar relacionado ao fato de os teores de MO também não diferirem nessa camada. As áreas continuaram a apresentar altos percentuais de agregados estáveis pertencentes a classes de diâmetros maiores, porém, os valores são mais baixos em relação à primeira área de estudo.

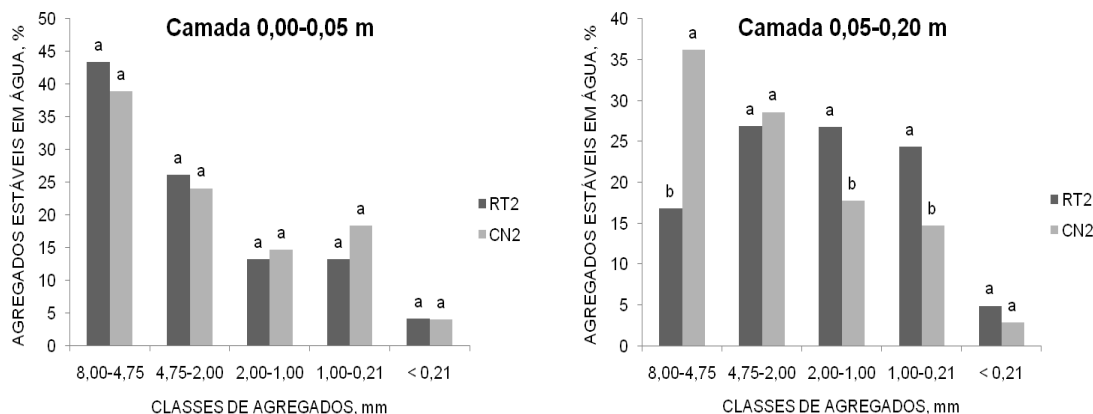


Figura 10 – Agregados estáveis em água em diferentes classes de agregados do Cambissolo Húmico, considerando a área de segunda rotação (RT2) e campo natural adjacente (CN2) nas diferentes camadas, Cambará do Sul, RS, Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada classe, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro.

Analisando a camada de 0,05 a 0,20 m, na classe de agregados de 8,00 a 4,75 mm, verifica-se que o campo natural apresentou diferença significativa, possuindo maior valor médio para essa classe (36,17%), mostrando-se altamente estável. Em contrapartida, a área com plantio de pinus em segunda rotação apresentou aumento da estabilidade de agregados com diâmetros menores. Esse resultado possivelmente reflete o manejo adotado na área, o qual promoveu a diminuição no teor de material orgânico pela queima e corte raso do povoamento, expondo mais facilmente o solo às intempéries do ambiente, reduzindo a estabilidade dos macroagregados e aumentando a estabilidade de agregados menores, corroborando com Longo et al. (1999).

Nesse caso, observa-se que a área com pinus em segunda rotação, camada de 0,00 a 0,05 m, conseguiu manter percentuais de agregados estáveis semelhantes a sua área testemunha. Desse modo, a partir desta evidência é possível inferir que nessa camada o carbono orgânico conseguiu restabelecer parcialmente seu estoque, considerando que o povoamento na época da coleta encontrava-se com 13 anos de idade.

Diante dos resultados da análise granulométrica (Tabela 2), nas camadas de 0,00 a 0,05 e de 0,05 a 0,20 m, nas duas áreas de estudo observa-se que estas se enquadram na classe textural argilosa; assim, não houve variação na distribuição do tamanho dos agregados devido a diferenças texturais no solo das áreas estudadas.

No povoamento de pinus, a distribuição dos agregados de acordo com o diâmetro médio geométrico, na primeira área de estudo, alcançou valores de 3,21 e 2,00 mm para as camadas de 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,20 m, respectivamente (Figura 11). O campo apresentou valores de 3,40 e 3,19 mm para as mesmas camadas citadas anteriormente; neste caso, somente na profundidade de 0,05 a 0,20 m houve diferença estatística entre os usos do solo.

Na segunda área de estudo, o povoamento de pinus alcançou valores de DMG de 2,83 e 1,54 mm e, a área de campo apresentou valores de 2,52 e 2,66 mm para as camadas de 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,20 m, respectivamente, onde somente nesta última ocorreu diferença significativa entre os usos do solo (Figura 11). Resultado semelhante foi obtido comparando preparo convencional, semeadura direta e campo nativo pastejado, em Cambissolo Húmico, onde observou-se que o tipo de manejo não afetou o DMP na camada de 0,0 a 2,5 cm (BERTOL et al., 2001).

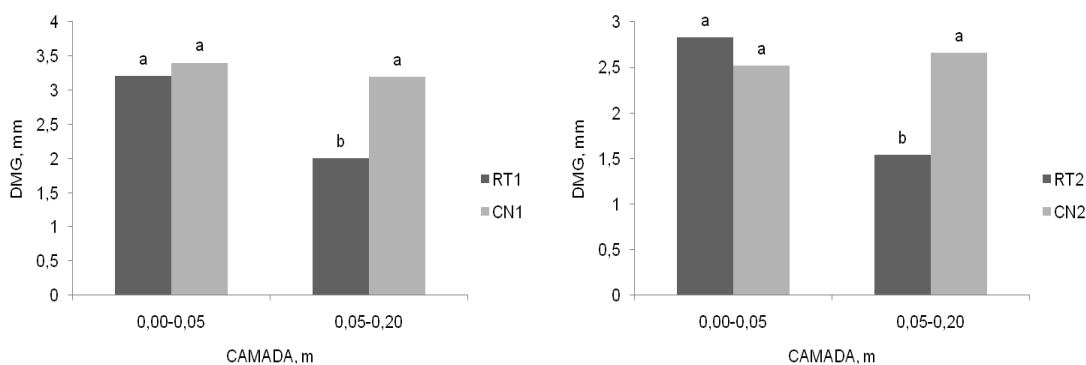


Figura 11 – Diâmetro médio geométrico (DMG) em diferentes camadas do Cambissolo Húmico, considerando a área de primeira e segunda rotação (RT1 e RT2) e seus respectivos campos naturais adjacentes (CN1 e CN2), Cambará do Sul, RS, Brasil. Médias não seguidas pela mesma letra, dentro de cada camada, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade de erro.

Nas duas áreas de estudo avaliadas, os povoamentos de pinus apresentaram redução do DMG em decorrência da diminuição dos teores de carbono orgânico total em profundidade, visto que em ambas as áreas essas variáveis demonstraram correlações positivas (Tabelas 4 e 5). Percebe-se ainda, na camada mais superficial, que as áreas experimentais e usos do solo apresentaram valores de DMG altos, indicando elevada estabilidade. Nesse sentido, pesquisando a qualidade do solo e sua relação com a produtividade de *P. taeda*, Morales et al. (2010) também

perceberam reduções do DMG em função do aumento da profundidade. No entanto, os autores observaram elevado valor médio do DMG (4,5 mm) até a profundidade de 0,6 m, indicando alta estabilidade de agregados mesmo nas camadas mais inferiores.

Contudo, a área de campo natural manteve esta estabilidade inclusive na camada de 0,05 a 0,20 m. Porém, tal estabilidade pode ser devida à compactação, como sugerido por Suzuki (2008), o qual infere que, além da textura e da matéria orgânica, a compressão do solo pelo pisoteio animal contribui para aumentar o DMP na camada superior a 0,10 m e, portanto, formar agregados de alta estabilidade e de baixa qualidade.

Por fim, verificou-se que a substituição do campo natural por povoamento de *P. taeda* não alterou a estabilidade de agregados na camada mais superficial (0,0 a 0,05 m), nem mesmo em área de segunda rotação, reafirmando, através desse atributo, que o efeito do pínus na superfície do solo não degrada a qualidade do mesmo. No entanto, na camada seguinte (0,05 a 0,20 m), houve redução da estabilidade de agregados, sugerindo por meio desta, que apenas o campo natural consegue manter a estabilidade em profundidade.

4.2 Propriedades químicas do solo

Os dados referentes às propriedades químicas do solo não apresentaram distribuição normal. Dessa forma, foram submetidos à transformação Box-Cox, entretanto, não se obteve êxito na normalização dos mesmos, sendo necessário aplicar o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Ressalva-se ainda o fato de os resultados dos atributos químicos representarem a condição natural do solo, visto que não foram realizadas adubações nas áreas de estudo avaliadas.

4.2.1 Cálcio e magnésio

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, na primeira área de estudo, camada de 0,0 a 0,05 m, verifica-se que os teores de cálcio foram estatisticamente maiores no campo natural do que no povoamento de *P. taeda* em primeira rotação e, nas demais camadas, não diferiram significativamente. Já na segunda área de estudo, observa-se que essa diferença permanece até a profundidade de 0,20 m,

onde os teores de Ca são maiores no campo natural em relação à área com pínus em segunda rotação. Quanto aos teores de magnésio, os mesmos foram menores nas duas áreas de estudo nos plantios de pínus (Tabela 8), diferindo da área de campo natural somente na camada superficial (0,0 a 0,05 m).

Tabela 8 – Propriedades químicas do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Área	Al	Ca	Mg	P	K	pH	pH _{SMP}
	cmol dm ⁻³			mg dm ⁻³			
Camada 0,0-0,05 m							
RT1	10,14 a*	0,79 b	0,68 b	5,31 a	44,80 a	4,68 b	4,09 b
CN1	8,76 b	1,39 a	1,00 a	2,99 b	44,40 a	4,83 a	4,18 a
RT2	9,85 a	0,86 b	0,28 b	5,74 a	26,00 b	4,25 b	4,05 b
CN2	5,67 b	1,78 a	0,76 a	2,54 b	96,40 a	4,86 a	4,42 a
Camada 0,05-0,20 m							
RT1	10,06 a	0,72 a	0,52 a	2,48 a	28,00 a	4,56 b	4,10 b
CN1	8,83 b	0,96 a	0,52 a	1,45 b	22,40 a	4,87 a	4,19 a
RT2	10,02 a	0,76 b	0,24 a	2,48 a	24,40 a	4,41 b	4,06 b
CN2	6,60 b	1,05 a	0,40 a	1,64 a	44,00 a	4,80 a	4,34 a
Camada 0,20-0,40 m							
RT1	9,42 a	0,72 a	0,40 a	0,79 a	17,20 a	4,87 b	4,15 a
CN1	9,48 a	0,72 a	0,36 a	0,89 a	16,40 a	5,00 a	4,21 a
RT2	8,93 a	1,08 a	0,36 a	2,54 a	41,60 a	4,69 b	4,20 a
CN2	6,69 a	0,84 a	0,32 a	0,99 a	30,80 a	4,94 a	4,36 a
Camada 0,40- 0,60 m							
RT1	9,19 a	0,67 a	0,24 a	0,64 a	13,60 a	4,94 b	4,22 a
CN1	9,21 a	0,79 a	0,32 a	0,53 a	14,80 a	5,09 a	4,19 a
RT2	10,72 a	0,74 a	0,24 a	1,16 a	22,80 a	4,70 b	4,11 a
CN2	6,71 b	0,89 a	0,28 a	0,64 a	20,00 a	5,06 a	4,36 a

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2.

Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis em 5% de probabilidade de erro.

Como se vê, diante dos resultados, a conversão do campo em plantio de pínus alterou os teores de Ca e Mg, os quais foram depleciados nas camadas mais superficiais do solo. Nesse caso, os teores de Ca encontrados no presente trabalho são considerados pela SBCS (2004) como baixos (≤ 2 cmol_c dm³). Já os valores de Mg são considerados baixos ($\leq 0,5$ cmol_c dm³), sendo alguns teores classificados

também como médios, devido à presença de valores entre 0,6 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Porém, cabe ressaltar que os Cambissolos Húmicos dessa região apresentam naturalmente baixos teores de cálcio e de magnésio (BRASIL, 1973).

Os menores teores de cálcio e de magnésio observados nas áreas com pínus em primeira e segunda rotação podem estar relacionados à lixiviação e a absorção desses elementos pelo elevado número de raízes finas, presentes nas camadas mais superficiais do solo (REISSMANN, 1983; MAFRA et al., 2008) e, assim, suprem as exigências nutricionais da espécie para garantir funções fisiológicas necessárias a sua sobrevivência. O mesmo foi reportado por Jandl et al. (2004) e Olszewska; Smal (2008).

O cálcio é considerado um elemento de baixa mobilidade, fazendo parte da estrutura das paredes celulares e concentrando-se principalmente na casca e nas acículas mais velhas (BRUM, 1980). Em um estudo que avaliou as perdas de cálcio em florestas de *Picea abies* L., percebeu-se que o nível de Ca nas acículas foi mais elevado em relação às concentrações de Ca presentes no solo (JANDL et al., 2004); dessa forma, este é considerado o macronutriente que mais retorna ao solo via deposição de serapilheira, apresentando um aporte total de $28,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em povoamento de *P. taeda* em segunda rotação (SCHUMACHER et al., 2008), suprimindo as demandas nutricionais da espécie através da ciclagem biológica, importante, sobretudo, nos sítios mais pobres.

Já o magnésio é um elemento importante nos processos enzimáticos, constituindo a molécula de clorofila (PRITCHETT; FISHER, 1987) e, portanto, sendo requerido pela planta nos processos da fotossíntese. Nesse sentido, caracterizando quimicamente um campo nativo após um ano da implantação de *P. taeda*, observou-se que o teor Mg nos primeiros 10 cm reduziu-se em mais de 50%, evidenciando o consumo pela absorção desse nutriente do solo, seguindo o mesmo padrão em profundidade (SCHUMACHER et al., 2000). Tal resultado foi atribuído ao fato de nos primeiros 20 cm do solo encontrar-se 80% das raízes finas, logo, neste ambiente, ocorre uma maior depleção do magnésio.

Resultados semelhantes foram evidenciados por Mafra et al. (2008), os quais encontraram, na camada 0,0 a 0,5 m, teores de Ca e Mg mais altos em campo nativo quando comparados a povoamentos de *P. taeda*, com 12 e 20 anos de idade. Nesse mesmo estudo, as áreas com pínus foram as que apresentaram os menores teores dentre todas as coberturas florestais avaliadas (floresta nativa e

reflorestamento de araucária). Outro estudo, em que compararam-se solos sob povoamentos antigos de *P. silvestris*, povoamentos jovens e áreas cultivadas, os teores de cátions trocáveis, bem como a saturação por bases, foram menores na área florestada há mais tempo, apresentando declínio nos teores de Ca, Mg e K, sugerindo que os mesmos foram substituídos por íons H^+ , refletindo em um aumento da acidez do solo (OLSZEWSKA; SMAL, 2008).

4.2.2 Fósforo e potássio

Na primeira área de estudo, camada 0,0 a 0,05 e 0,05 a 0,20 m, os teores de fósforo mostraram-se estatisticamente maiores no plantio de pínus em primeira rotação do que em relação ao campo natural (Tabela 8). Na segunda área de estudo, foi evidenciado o mesmo comportamento, porém diferindo significativamente apenas na camada de 0,0 a 0,05 m. Quanto aos teores de potássio, estes não apresentaram diferenças estatísticas na primeira área de estudo, em nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 8). Já em segunda rotação, houve diferença somente na camada de 0,0 a 0,05 m, sendo os teores de K maiores no campo natural.

De acordo com SBCS (2004), os dados referentes aos teores de P disponíveis em geral foram muito baixos ($\leq 3 \text{ mg dm}^{-3}$), com exceção das camadas mais superficiais dos povoamentos de pínus em primeira e segunda rotação, as quais apresentaram valores um pouco mais elevados, classificando-se como baixos. Este resultado já era esperado, devido a pouca disponibilidade desse nutriente no solo da região, em consequência da elevada acidez (SCHUMACHER et al., 2008), pois valores de pH abaixo de 5,5 são geralmente associados a reduções na disponibilidade de fósforo (YOUNG, 1976 apud FEARNSIDE; FILHO, 2002).

Os teores de fósforo encontrados, apesar de serem considerados baixos, apresentaram-se maiores nas áreas com plantios de pínus em relação às áreas de campo. Isso indica que o pínus não degradou a qualidade do solo diante desse atributo já que, em segunda rotação, o fato de o maior teor permanecer apenas na camada superficial, possivelmente esteja associado ao manejo aplicado antes da implantação. Desse modo, nota-se que os maiores teores de P ocorreram juntamente com os de alumínio, evidenciando que em tais condições de acidez do solo, o Al reage com os íons fosfato, retendo o P e evitando que o mesmo seja lixiviado para as camadas subsuperficiais (PRITCHETT; FISHER, 1987). Além disso,

os maiores teores de matéria orgânica presentes nestas camadas podem estar favorecendo esse resultado, bem como a ocorrência de micorrizas, que desempenham papel importante na mobilização do fósforo em formas disponíveis (FEARNSIDE; FILHO, 2002).

Resultados semelhantes foram encontrados avaliando-se os atributos químicos do solo em diferentes coberturas florestais, em que o solo sob *P. taeda*, com 20 anos de idade, apresentou maiores teores de fósforo disponível até a camada de 0,20 m. O resultado foi relacionado à absorção diferenciada de P pelo pínus e, ainda, à influência de fungos micorrízicos que ocorrem naturalmente na área e modificam a conformação do sistema radicular e a habilidade da planta de aproveitar esse elemento presente normalmente em baixos teores no solo (MAFRA et al., 2008). Nesse sentido, estudando campo nativo após um ano da implantação da espécie, também se perceberam diferenças significativas até a camada de 0,30 m, apresentando teores de fósforo maiores do que os verificados antes do plantio (SCHUMACHER et al., 2000).

Com relação ao K, os teores encontrados foram muito variados. De modo geral, foram classificados conforme SBCS (2004) como muito baixos ($\leq 30 \text{ mg dm}^{-3}$); no entanto, houve teores entre 31 e 60 mg dm^{-3} , considerados baixos e, na camada 0,0 a 0,05 m, o teor de K foi classificado como alto (campo natural da segunda área de estudo). Observa-se, com exceção da camada 0,20 a 0,40 m da área com pínus em segunda rotação, que os teores de K do solo decresceram em profundidade, apresentando-se maiores na superfície. Logo, esse comportamento pode estar associado à maior presença dos constituintes orgânicos nas camadas superficiais; o mesmo foi relatado por outros autores como Schumacher et al. (2000); Prado; Natale (2003) e Mafra et al. (2008).

Liu et al. (2002), estudando o efeito das propriedades químicas do solo em floresta natural, pastagens, vegetação arbustiva, floresta secundária e floresta cultivada, também não encontraram diferenças significativas nos teores de K entre os distintos usos. No entanto, na segunda área de estudo do presente trabalho, observou-se teores menores de K na área com pínus, camada de 0,0 a 0,05 m, sendo o mesmo reportado por Mafra et al. (2008). Esse resultado pode ser atribuído à elevada capacidade de absorção desse elemento, visto que o K é um elemento extremamente móvel no solo, considerando que um simples aumento do suprimento

hídrico é suficiente para garantir sua boa disponibilidade às plantas (REISSMANN; WISNIEWSKY, 2005).

4.2.3 Alumínio trocável e pH do solo

Os dados referentes aos teores de alumínio, nas duas áreas de estudo, apresentaram-se estatisticamente maiores nos povoamentos de *P. taeda* (Tabela 8). Essa superioridade dos valores de Al em ambas as áreas prevaleceu até a profundidade de 0,20 m, com exceção da camada 0,40 a 0,60 m da segunda área experimental, a qual apresentou comportamento fora dos padrões. No geral, os teores de Al trocável variaram entre 5,67 e 10,14 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo considerados teores elevados (BRASIL, 1973), justificados pelos baixos valores de pH, favorecendo a solubilização do Al trocável no solo. No entanto, vale ressaltar, que o alumínio é determinado por titulação ácido-base, onde os componentes ácidos do solo extraídos com KCl 1M são referidos como Al trocável, indistintamente de sua natureza, o que em alguns casos, pode superestimar os valores de Al, uma vez que parte dessa acidez pode ser atribuída ao hidrogênio, principalmente em solos com alto teor de matéria orgânica (TEDESCO et al., 1995).

De acordo com os dados referentes à acidez ativa (pH em água) do solo, apresentados na Tabela 8, verifica-se que na primeira área de estudo o povoamento de *P. taeda* em primeira rotação se diferenciou significativamente do campo natural, em todas as camadas avaliadas, nas quais o campo foi o que apresentou as maiores médias. Já na segunda área de estudo, o povoamento de pínus apresentou novamente os valores mais baixos e estatisticamente diferentes do campo natural, em todas as camadas, demonstrando, inclusive, médias mais baixas do que a área de primeira rotação.

De modo geral, nas duas áreas de estudo, os valores de pH em água foram muito baixos, fato já esperado devido aos Cambissolos Húmicos serem fortemente ácidos, com pH variando de 4,5 a 5,0 ao longo do perfil (BRASIL, 1973). No entanto, a maior acidificação do solo observada nas áreas com plantios de pínus é comum em locais que apresentam esta atividade, podendo isso ocorrer devido à lixiviação de bases e absorção de elementos pelas árvores (MAFRA et al., 2008). Considera-se ainda, o fato de as substâncias húmicas, presentes na camada superficial, terem a capacidade de atrair íons, em que a maior atração se dá com o íon alumínio (maior

valência), permanecendo mais tempo no solo, enquanto que os outros cátions (Ca, Mg e K) tendem a ser percolados no perfil (BISSANI et al., 2004).

Além disso, a acidez observada pode estar relacionada ao aporte de serapilheira formada principalmente por acículas (BRUN, 2008), que apresentam altos teores de alumínio (BRUM, 1980). A acidificação pode ser atribuída também à entrada de ácidos orgânicos provenientes da lixiviação desse material, promovendo maior respiração no solo, nitrificação, bem como perdas de nitrato (WIESMEIER et al., 2009). Dessa forma, os ácidos orgânicos produzidos pela decomposição da serapilheira atuam no sentido de favorecer o processo de intemperismo e acidez do solo, pois alguns produtos da decomposição da matéria orgânica podem agir como agentes quelantes, facilitando a hidrólise do alumínio e, portanto, liberando íons H^+ e reduzindo o pH do solo (PRITCHETT; FISHER, 1987). Resultados semelhantes foram evidenciados por Lepsch (1980); Prado; Natale (2003) e Mafra et al. (2008).

Nota-se que na segunda área de estudo o povoamento de pinus apresentou valores de pH em água menores do que o plantio em primeira rotação (primeira área de estudo), resultado que possivelmente reflete o fato de a queima nessa área ter sido realizada apenas na implantação do povoamento, decorrido o tempo necessário de cultivo para acumular material em decomposição e influenciar os menores valores de pH do solo; mesmo comportamento reportado por Brun (2008). Nesse caso, logo após a queima, ocorre um aumento da alcalinidade, elevando os valores de pH do solo, no entanto, a magnitude das mudanças irá depender das bases trocáveis contidas nas cinzas, assim como da textura e do teor de matéria orgânica do solo (PRITCHETT; FISHER, 1987). Todavia as cinzas restantes da queima ficam sujeitas à erosão e lixiviação (ANDRAE, 1978). Rheinheimer et al. (2003), avaliando as modificações do campo nativo após a queima, em um Cambissolo Húmico Alumínico, perceberam que, decorridos 220 dias da queima, os valores de pH decresceram acentuadamente, corroborando com os resultados obtidos no presente trabalho.

Observa-se ainda, nas duas áreas de estudo, uma tendência de elevação dos valores de pH com a profundidade. Esse comportamento pode ser atribuído à decomposição da serapilheira na camada superficial, como discutido anteriormente. Também deve ser considerada a presença de raízes finas nessa camada, as quais utilizam as bases trocáveis para as funções fisiológicas da planta e, ainda, a intensa atividade de organismos vivos do solo, que durante o processo de decomposição

produzem dióxido de carbono, favorecendo também a redução do pH do solo (SCHUMACHER et al., 2000; BRUN, 2008).

Nas duas áreas de estudo, a acidez potencial (pH_{SMP}) diferiu significativamente até a camada de 0,20 m (Tabela 8), apresentando valores maiores nas áreas de campo natural e, conseqüentemente, menor acidez. Esse resultado deve-se ao fato de que os elevados teores de alumínio trocável e matéria orgânica ocorrem nessas camadas, principalmente nas áreas com plantios de pinus, exigindo maiores quantidades de carbonatos para sua correção (BISSANI et al., 2004), evidenciando o alto poder de tamponamento dos Cambissolos Húmicos.

Enfim, o pinus alterou significativamente os teores de alumínio trocável e a acidez do solo, elevando os teores de Al e reduzindo o pH, principalmente até a camada de 0,20 m, sugerindo, por meio desses atributos químicos, a influência na depleção de outros elementos, refletindo numa diminuição da qualidade química do Cambissolo Húmico.

4.2.4 Nitrogênio total e carbono orgânico total

Conforme os dados apresentados na Tabela 9, os teores de nitrogênio na primeira área de estudo apresentaram-se estatisticamente maiores no campo natural (camada de 0,0 a 0,05 m) e no povoamento de pinus em primeira rotação (camada 0,20 a 0,40 m). Na segunda área de estudo, houve diferença significativa apenas na camada de 0,05 a 0,20 m, na qual o campo natural obteve a média mais elevada de N. Com relação aos teores de carbono orgânico (Tabela 9), a primeira área de estudo demonstrou o mesmo comportamento do nitrogênio, apresentando também médias estatisticamente maiores no campo natural (camada de 0,0 a 0,05 m) e no povoamento de pinus em primeira rotação (camada 0,20 a 0,40 m). Já na segunda área de estudo, houve diferenças nas camadas 0,05 a 0,20 m e 0,40 a 0,60 m, apresentando médias mais elevadas nas áreas de campo natural e plantio de pinus em segunda rotação, respectivamente. Quanto aos teores de material orgânico, esses foram semelhantes ao C, visto que a MO é obtida pela percentagem de carbono orgânico total multiplicada por 1,724 (Tabela 9). No caso da relação C/N, esta não diferiu estatisticamente nas duas áreas de estudo avaliadas (Tabela 9).

Tabela 9 – Nitrogênio total, Carbono orgânico total, Matéria orgânica e Relação C/N do Cambissolo Húmico para as áreas e camadas em estudo, Cambará do Sul, RS, Brasil

Área	Nitrogênio total	Carbono orgânico total	Matéria orgânica	C/N
	g kg ⁻¹		%	
Camada 0,00-0,05 m				
RT1	2,28 b*	39,1 b	67,4 b	17,1 a
CN1	2,96 a	49,9 a	86,0 a	16,9 a
RT2	3,11 a	47,6 a	82,0 a	15,3 a
CN2	3,00 a	40,6 a	70,1 a	13,5 a
Camada 0,05-0,20 m				
RT1	2,17 a	37,6 a	64,8 a	17,3 a
CN1	2,10 a	37,6 a	64,8 a	17,9 a
RT2	1,79 b	27,2 b	46,9 b	15,2 a
CN2	2,14 a	32,1 a	55,4 a	15,0 a
Camada 0,20-0,40 m				
RT1	1,50 a	26,7 a	46,0 a	17,8 a
CN1	1,33 b	23,1 b	39,8 b	17,4 a
RT2	1,91 a	27,9 a	48,2 a	14,6 a
CN2	1,41 a	23,6 a	40,6 a	16,7 a
Camada 0,40- 0,60 m				
RT1	1,03 a	17,9 a	30,9 a	17,4 a
CN1	1,02 a	17,0 a	29,3 a	16,7 a
RT2	1,15 a	20,0 a	34,4 a	17,4 a
CN2	0,97 a	16,9 b	29,2 b	17,4 a

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo natural adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo natural adjacente à RT2.

Médias não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis em 5% de probabilidade de erro.

Na primeira área de estudo, camada superficial (0,0 a 0,05 m), observa-se que a área de campo natural apresentou maior teor de carbono orgânico em relação à área com pinus em primeira rotação. O mesmo foi observado por Zinn et al. (2002). Esse resultado pode estar relacionado ao fato de as raízes das gramíneas serem anualmente renovadas, proporcionando maior incorporação do carbono orgânico no horizonte superficial do campo natural (LEPSCH, 1980). No entanto, Lepsch (1980) afirma que nos florestamentos, a matéria orgânica incorporada à camada mineral superficial do solo em pouco tempo tende a atingir quantidade em

equilíbrio com as condições do ambiente. Bochner et al. (2008) citam em seu trabalho que existe relação entre o conteúdo de carbono orgânico do solo e a idade do florestamento.

Como se pode perceber, deve ser considerada conjuntamente a composição da serapilheira depositada na superfície do solo, a qual apresenta uma decomposição e incorporação mais lenta se comparada ao material orgânico fornecido pelas gramíneas, contribuindo para os menores valores de C e N encontrados no povoamento de pínus (WIESMEIER et al., 2009). Nesse caso, os últimos autores também associaram a redução do N à absorção desse elemento e imobilização na biomassa acima do solo. Além disso, ressaltam o fato da supressão das leguminosas fixadoras de N por plantios de pínus, favorecendo a lixiviação do N mineralizado, contribuindo ainda mais para a depleção desse elemento, bem como para uma maior relação C/N (NEUFELDT et al., 2002).

Na segunda área de estudo, verifica-se que na camada superficial (0,0 a 0,05 m), os teores de carbono orgânico e nitrogênio do plantio com pínus em segunda rotação igualaram-se estatisticamente aos teores encontrados no campo natural, corroborando com Lepsch (1980), apresentando inclusive, médias mais elevadas. Gonçalves (2002) afirma que a remoção da floresta, a queima dos resíduos vegetais e o excessivo revolvimento do solo causam diminuição do aporte e aumento da degradação da matéria orgânica, desestabilizando a estrutura do solo. No entanto, foram encontrados maiores teores de carbono orgânico total em plantios com pínus, onde a biomassa havia sido queimada, demonstrando que os danos promovidos pela queima e/ou retirada da biomassa são contrabalançados pelo significativo aporte de serapilheira pelos povoamentos plantados (BRUN, 2008).

Nesse sentido, Balbinot et al. (2003) encontraram maiores teores de carbono orgânico na camada de 0 a 20 cm, representando 36,8% do total. Desse modo, o povoamento com pínus tem se mostrado eficiente na manutenção do estoque de carbono total do solo, bem como, tende a aumentar na superfície do mesmo (COSTA LIMA et al., 1995). Os últimos autores, perceberam que, decorridos 20 anos, a camada superficial do solo (0 a 10 cm) com plantio de pínus teve a composição isotópica da MO significativamente alterada.

De acordo com outros trabalhos realizados na mesma região, verifica-se que é comum a formação de uma espessa camada húmica no solo, devido às baixas temperaturas, alta umidade e elevada acidez, elevando a relação C/N e reduzindo

as taxas de decomposição, o que favorece os aumentos nos teores de MO e o estoque de CO no solo, principalmente na camada superficial, como verificado na Tabela 9, em que apesar da relação C/N não diferir estatisticamente entre as áreas estudadas, observa-se que na camada de 0,0 a 0,05 m, os povoamentos de pínus mostraram maiores valores absolutos em relação às suas testemunhas. Além disso, por se tratar de uma área em segunda rotação, o sistema radicular do primeiro ciclo ainda encontra-se em decomposição (Apêndice A), sendo importante fonte de carbono ao solo, visto que as raízes, no total do C fixado, correspondem a 19% do total da biomassa do *P. taeda* com apenas 5 anos de idade (BALBINOT et al., 2003).

Portanto, a substituição do campo natural por povoamentos de *P. taeda* alterou os atributos químicos avaliados, em que o plantio de pínus tendeu a diminuir os teores de C e N apenas na camada mais superficial do Cambissolo Húmico. No entanto, esse comportamento muda na segunda rotação, em que a área com plantio de pínus mantém-se semelhante ao campo nessa camada. Isso infere, em longo prazo, que o povoamento de pínus é capaz de manter no solo níveis de C e N similares ao campo original, pois é possível que os teores mais baixos vistos na camada seguinte estejam relacionados ao manejo adotado na área.

5 CONCLUSÕES

A partir do estudo pode-se concluir que:

- ✓ A conversão do campo natural em povoamentos de *Pinus taeda* não alterou a densidade do Cambissolo Húmico, mantendo a qualidade estrutural do mesmo. Também não houve alteração na porosidade total do solo, no entanto, os povoamentos de pínus promoveram aumentos na macroporosidade nas camadas mais superficiais, refletida nos valores de condutividade hidráulica e de permeabilidade do solo ao ar.
- ✓ Os povoamentos de *P. taeda* não alteraram a estabilidade de agregados na camada superficial, porém, na camada seguinte, somente o campo natural conseguiu manter a estabilidade em profundidade.
- ✓ As propriedades químicas do Cambissolo Húmico foram alteradas, evidenciando reduções nas bases trocáveis (Ca e Mg) nas camadas superficiais, no entanto, os teores de P apresentaram-se maiores nas áreas com povoamentos de pínus. O pínus também alterou os níveis de alumínio trocável e a acidez do solo, elevando os teores de Al e reduzindo o pH. Os teores de C e N foram reduzidos na camada mais superficial do solo, porém este comportamento muda na segunda rotação, em que a área com plantio de pínus manteve níveis de C e N similares aos do campo original.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2009. Brasília, 140 p., 2010.

ABRÃO, S. F. **Atividades silviculturais desenvolvidas na empresa Cambará S.A. Produtos Florestais**. 2008. 65 f. Relatório de Estágio (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ALMEIDA, J. A. de. Fatores abióticos. In: BOLDRINI, I. I. et al. **Biodiversidade dos campos do planalto das araucárias**. Brasília: MMA, 2009. p. 19-38.

ANDRAE, F. **Ecologia florestal**. Santa Maria: UFSM – DCFL, 1978.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 857-865, out./dez. 2000.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, set./out. 2007.

BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 59-68, jan./jun. 2003.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**, part 4, 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. p. 1141-1158.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, v. 39, n. 3, p. 327–339, sept. 1988.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil structure: classification and genesis. In: BAVAR, L. D.; GARDNER, W. H. & GARDNER, W. R (Eds.). **Soil Physics**, New York: John Wiley, p.130-177, 1972.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, jul./dez. 2006.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev. 2004.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, julho/set. 2001.

BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no planalto catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 263-267, fev. 1995.

BISSANI, C. A.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 181-204.

BOCHNER, J. K. et al. Matéria orgânica e agregação de um planossolo sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 46-53, jan./mar. 2008.

BOGNOLA, I. A. et al. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, jan./abr. 2010.

BOLDRINI, I. I. et al. Flora. In: BOLDRINI, I. I. et al. **Biodiversidade dos campos do planalto das araucárias**. Brasília: MMA, 2009. p. 39-94.

BOLDRINI, I. I. Campos sulinos: caracterização e biodiversidade. In: ARAÚJO, E. L. et al. **Biodiversidade, conservação e uso sustentável da flora do Brasil**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2002. p. 95-97.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989. 898 p.

BRANDÃO, V. et al. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 413 p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

BRUM, E. Composição química de acículas verdes e da liteira de *Pinus elliotti* Engelm. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 17-23. 1980.

BRUN, E. J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *P. elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul**. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CARON NETO, M. *Pinus* conquista espaço na região Sul. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 58, n. 10, p. 24-28, ago. 2001.

CARVALHO, A. P. de. et al. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 51-66, jul./dez. 1999.

CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, out./dez, 1999.

CAVICHIOLO, S. R. **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de *Pinus taeda***. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CAVICHIOLO, S. R.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Modificações nos atributos físicos de solos submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 571-577, jul./ago. 2005.

CHIEF, K.; FERRÉ, T. P. A.; NIJSSEN, B. Correlation between Air Permeability and Saturated Hydraulic Conductivity: Unburned and Burned Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 6, p. 1501-1509, nov./dec. 2008.

COSTA, A. da. et al. Alterações físicas e químicas num cambissolo húmico de campo nativo após a correção da acidez. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 2, p. 118-130, ago. 2006.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 7 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004. 527p.

COSTA LIMA, V. et al. Efeito da substituição de campo natural por *Pinus* na dinâmica do carbono do solo. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 14, n. 1-2, p. 7-12, 1995.

CURMI, P.; KERBMAN, F. F.; QUEIROZ NETO, J. P. Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil). In: Ringrose-Voase, A. J.; Humphreys, G. S. **Soil micromorphology: studies in management and genesis**. Roc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1994. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam, p. 569-579.

DALBEN, A. D.; OSAKI, F. Atributos físicos do solo de um Cambissolo Háplico em floresta nativa e de *Pinus taeda*. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 29-37, jan./mar. 2008.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DEDECEK, R. A. Meio físico para o crescimento de *Pinus*: limitações e manejo. In: SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.75-109.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (ed). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1994. p. 03-21.

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.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

FEARNSIDE, P. M.; FILHO, N. L. In: Solo e desenvolvimento na Amazônia: lições do projeto dinâmica biológica de fragmentos florestais. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2002. Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/mss%20and%20in%20press/SOIL-LEport5.pdf>. Acesso em: 8.dez.2010.

FERREIRA, C. A. et al. **Nutrição de pinus no sul do Brasil**: diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. (Embrapa Florestas. Documentos, 60).

FORTES, A. B. **Aspectos fisiográficos, demográficos e econômicos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Globo, 1956.

FOWELLS, H. A. Silvics of forest trees of the United States. Washington, DC: USDA, Forest Service, 1965. (USDA. For. Serv. Agric. Handbook, 271).

GAVANDE, S. A. **Física de solos**: principios y aplicaciones. México: Editorial Limusa. 1976.

GONÇALVES, J. L. M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p.1-46.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo> exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr. 2006.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HORBACH, R. et al. Geologia. In: IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de Recursos Naturais**, vol. 33, Folha SH 22, Porto Alegre e parte das folhas SH 21 e SI 22 Lagoa Mirim. Capítulo 1, Rio de Janeiro, 1986, 786 p.

HUECK, K. **As florestas da América do Sul**. São Paulo: Polígono, 1972. 466 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://et.al.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=430360>>. Acesso em: 15 out. 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de recursos naturais**, vol. 33, Folha SH 22, Porto Alegre e parte das folhas SH 21 e SI 22 lagoa Mirim. Capítulo 2, Rio de Janeiro, 1986. 796 p.

IVERSEN, B. V. et al. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, v. 166, n. 2, p. 97-106, feb. 2001.

JANDL, R.; ALEWELL, C.; PRIETZEL, J. Calcium loss in Central European Forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 2, p. 588-595, mar. 2004.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK C.A. **Physical and mineralogical methods**. Madison, Wisconsin: ASA & SSSA, 1965. p. 495- 509.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212 p.

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

LAURÉN, A.; MANNERKOSKI, H.; ORJASNIEMI, T. Thermal and aeration properties of mor layers in Finland. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Joensuu, v. 15, n. 4, p. 433-444, nov. 2000.

LAURÉN, A. Physical properties of the mor layer in a Scots pine stand. II. Air permeability. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, n. 4, p. 635-642, nov. 1997.

LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. Vegetação. In: IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ed.). **Geografia do Brasil: Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. p. 113-150.

LEPSCH, I. F. Influência do cultivo de Eucalyptus e Pinus nas propriedades químicas de solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 103-107, mai./ago. 1980.

LIMA, C. L. R. de. et al. Atributos físicos de um planossolo háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1849-1855, set./out. 2008.

LIMA, C. L. R. de. et al. Estabilidade de agregados de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, jan./fev. 2003.

LIU, S. L. et al. D. Effects of reforestation and deforestation on soil properties in humid mountainous areas: a case study in Wolong Nature Reserve, Sichuan province, China. **Soil Use and Management**, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 376-380, Dec. 2002.

LONGO, R. M.; ESPÍNDOLA, C. R.; RIBEIRO, A. I. Modificações na estabilidade de agregados no solo decorrentes da introdução de pastagens em áreas de cerrado e floresta amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v. 3, n. 3, p. 276-280, set./dez. 1999.

LUCIANO, R. V. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num cambissolo háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 9, n. 1, p. 09-19, fev. 2010.

MAFRA, A. L. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 217-224, mar./abr. 2008.

MALUF, J. R. T. In: Nova classificação climática do Rio Grande do Sul. Passo Fundo: EMBRAPA – Trigo, Pesquisa em andamento, n° 8, 1999. Disponível em: <http://et al..cnpt.embrapa.br/biblio/p_pa08.htm>. Acesso em: 12.out.2010.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: UFSM, 2005.

MARQUES, J. D. O. et al. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, abr./jun. 2008.

MARQUES, F. A. et al. Caracterização e classificação de cambissolos do arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1023-1034, set./out. 2007.

MARTINS, E. C. **Caracterização e quantificação mineralógica da fração argila do horizonte Bi dos cambissolos da região de Irati, Paraná, pelo método de Rietveld**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.

MARTINS, S. G. et al. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-42, jan./jun. 2002.

MCCARTHY, K. P.; BROWN, K. W. Soil Gas Permeability as Influenced by Soil Gas-Filled Porosity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 997-1003, jul./aug. 1992.

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, nov./dez. 2008.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, mai./jun. 2004.

MIROV, N. T. **The genus pinus**. New York: The Ronald Press Company, 1967.

MORALES, C. A. S. et al. Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no planalto catarinense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 629-640, out./dez. 2010.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961.

MORO, L. **Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* baseada em volume estimado pelo sistema SISPINUS**. 2005. 130 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOSER, J. M. Solos. In: IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ed.). **Geografia do Brasil: região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. p. 85-111.

MOTA, F. S.; BEIRSDORF, M. I. C.; GARCEZ, J. R. B. **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Normais agroclimáticas. Pelotas: Ministério da Agricultura, Instituto de Pesquisa Agropecuária. 1971, v. 1 (Circular, 50).

MOLDRUP, P. et al. Air permeability in Undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 1, p. 32-40, jan. 2003.

NAHUZ, M. A. R. Atividades industriais com madeira de pinus: atualidade e desafios. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 83, p. 10-12, ago. 2004.

NAMBIAR, E. K. S. Productivity and sustainability of plantation forests. **Bosque**, Valdivia, v. 20, n. 1, p. 9-21, jan./jun. 1999.

NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. Towards sustained productivity of tropical plantations: science and practice. In: NAMBIAR, E. K. S. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 527-553. (ACIAR Monograph, n. 43).

NASCIMENTO, P. C. do. et al. Roteiro e relatório da excursão técnica – pedologia. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NEUFELDT, H.; RESCK, D. V. S.; AYARZA, M. A. Texture and land-use effects on soil organic matter in cerrado oxisols, central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, n. 3-4, p. 151-164, jun. 2002.

NEVES, C. M. N. das. et al. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 74, p. 45-53, jun. 2007.

NOVÁK, P.; VOPRAVIL, J.; LAGOVÁ, J. Assessment of the soil quality as a complex of productive and environmental soil function potentials. **Soil & Water Research**, v. 5, n. 3, p. 113–119, jul./set. 2010.

OADES, J. M. The role of biology in formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, mar. 1993.

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

OLSZEWSKA, M.; SMAL, H. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. I. Physical and sorptive properties. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 305, n. 1-2, p. 157-169, Apr. 2008.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Alterações na granulometria, grau de floculação e propriedades químicas e de um latossolo vermelho distrófico, sob plantio direto e reflorestamento. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 45-52, jan./jun. 2003.

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

PRIETZEL, J. et al. Recent carbon and nitrogen accumulation and acidification in soils of two scots pine ecosystems in Southern Germany. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 289, n. 1-2, p. 153-170, oct. 2006.

PRITCHETT, W. L.; FISHER, R. F. **Properties and management of forest soils**. 2 ed. New York: John Wiley e Sons. 1987.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul**: ensaio de monografia natural. 3. ed. São Leopoldo: UNISINOS. 2005.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5. p. 49-134.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 26, p. 26-48, jul./dez. 2003.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M. da.; CABEDA, M. S. V. Índices de estabilidade de agregados e suas relações com características e parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 2, p. 283-290, maio./ago. 1993.

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. 1931-1935, nov./dez. 2006.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Nutritional aspects of pine plantations. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrition and Forest fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2005. p.135-166.

REISSMANN, C. B. Morfologia dos horizontes de húmus em florestas de coníferas exóticas no sul Brasil. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 5, p. 11-16. 1983.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1999.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 49-55, jan./fev. 2003.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, set./out. 2005.

SBCS. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS/CQFS, 2004.

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo: SBS, 2008.

SCHULTZ, R. P. **The ecology and culture of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.)**. New Orleans: Agricultural Handbook 713. U. S. Department of Agriculture, Forest Service Washington, D. C., p. 20-28, 1997.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471-480, out./dez. 2008.

SCHUMACHER, M. V. et al. **Caracterização física e química de um solo em uma área de campo nativo, com floresta de *Pinus taeda* L.** Santa Maria: Laboratório de Ecologia Florestal/FATEC/UFMS, 2000. 30 p.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.49-73.

SILVA, A. P. da. et al. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535-1545, nov./dez. 2009.

SILVA, G. J. et al. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2135-2143, set./out. 2008b.

SILVA, L. G. da. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de um latossolo de cerrado sob cultivo de espécies florestais. In: IX SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O CERRADO, 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: IX Simpósio Nacional sobre o Cerrado, 2008a.

SILVA, M. L. da.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia florestal.** 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2005a.

SILVA, A. M. et al. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em cambissolo e latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.12, p.1223-1230, dez. 2005b.

SILVA, I. F. da; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 311-317, abr./jun. 1998.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual.** Washington: United States Department of Agriculture, 1993. 437p. (Handbook, 18).

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um latossolo vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, jan./mar. 2003.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/ASCAR-RS, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. **Qualidade físico-hídrica de um argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil**. 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos: UFRGS, 1995. 174 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p.141-161. Jun. 1982.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade dos solos**. 6 ed. São Paulo: Organização Andrei, 2007.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, set./out. 2005.

TUOTO, M.; HOEFLICH, V. A. A indústria florestal brasileira baseada em madeira de *Pinus*: limitações e desafios. In: SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.17-47.

TUOTO, M. O apagão florestal e suas implicações. **Gazeta Mercantil**, São Paulo, p. 3, 2 abril 2003.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. da. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 166, n. 1-3, p. 285-294, aug. 2002.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. **Journal American Society of Agriculture**, Madison, v. 28, n. 5, p. 337-351, may. 1936.

WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p.487-494, maio 2005.

WIESMEIER, M. et al. Depletion of soil organic carbon and nitrogen under *Pinus taeda* plantations in Southern Brazilian grasslands (Campos). **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 3, p. 311-487, may./jun. 2009.

WOHLENBERG, E. V. et al. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 891-900, set./out. 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Raiz da espécie *P. taeda* em decomposição numa área de segunda rotação, Cambará do Sul, RS, Brasil



APÊNDICE B - Atividade da fauna edáfica em área com povoamento de *P. taeda* em primeira rotação, Cambará do Sul, RS, Brasil

