

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

**DINÂMICA DO ARMAZENAMENTO E DA  
DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM ARGISSOLO SOB  
EUCALIPTO E CAMPO NATIVO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Juliana Prevedello**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**



**DINÂMICA DO ARMAZENAMENTO E DA DISPONIBILIDADE  
DE ÁGUA EM ARGISSOLO SOB EUCALIPTO E CAMPO  
NATIVO**

**Juliana Prevedello**

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

**Orientador: Prof. Dalvan José Reinert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

P944d Prevedello, Juliana  
Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em Argissolo sob eucalipto e campo nativo / por Juliana Prevedello. – 2012.  
120 p.; il.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2012

1. Retenção de água 2. Aeração do solo 3. Florestas plantadas  
4. Propriedades físicas 5. Água disponível I. Reinert, Dalvan José II. Título

CDU 630.2

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

---

© 2012

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

---

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

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

**DINÂMICA DO ARMAZENAMENTO E DA DISPONIBILIDADE DE  
ÁGUA EM ARGISSOLO SOB EUCALIPTO E CAMPO NATIVO**

elaborada por  
**Juliana Prevedello**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Dalvan José Reinert, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

**Reimar Carlesso, (UFSM)**

**Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)**

**Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC/CAV)**

**Edison Rogerio Perrando, Dr. (UFSM/CESNORS)**

Santa Maria, 02 de março de 2012.



Dedico esta obra ao meu namorado Eduardo e especialmente aos meus pais, Célio e Lurdes Prevedello, que me proporcionaram uma vida digna, onde eu pudesse crescer, acreditando que tudo é possível, desde que sejamos honestos, íntegros de caráter e tendo a convicção de que sonhar e concretizar os sonhos só dependerão de nossa vontade.



## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de realização desse trabalho;

Ao professor e orientador Dalvan José Reinert pela dedicação, ensinamentos, paciência e amizade que foram de suma importância para minha formação;

Ao professor Frederico Dimas Fleig, Cesar A. G. Finger, Luiz Eduardo A. S. Suzuki e José Miguel Reichert pelas sugestões, ensinamentos durante a minha formação e, principalmente, no processo de qualificação;

Ao professor, colega e amigo Douglas R. Kaiser que me incentivou, auxiliou e, acima de tudo, me ensinou todos os passos necessários para a implantação e execução do experimento, obrigada pela amizade, explicações e dedicação incansável.

Em especial, à minha amiga Eracilda Fontanela, pelos momentos maravilhosos que passamos juntas durante essa caminhada.

Aos amigos e colegas do LaFis, Leandro, Mirian, Mentges, Davi, Cedinara, Eloi, Jean Sampietro, Júlio, Marta, além dos bolsistas de iniciação científica Alan, Tiaguinho, Claudine, Mayra, André e Alencar pelo companheirismo e ajuda prestada para a realização dos trabalhos de campo e laboratório. Em especial ao amigo Paulo, pelo conhecimento e explicações sobre estatística e o “mundo solo”;

Às luluzinhas do LaFis, Era, Cláudia, Neiva, Alessandra, Márcia, Claudine, Mayra pela amizade, troca de informações e descontração durante os intermináveis bate-papos.

À FEPAGRO Florestas pela disponibilidade da área e, em especial, ao Roberto Trevisan e aos funcionários Plínio e Pedro pela dedicação, amizade e disposição em ajudar nas intermináveis tarefas;

Ao Fonti, pela amizade e auxílio para realização das análises laboratoriais. E à Cerlene Machado (Tita), funcionária da PPGEF, pelo carinho e lembretes;

À minha família e ao meu namorado Eduardo pelo amor e compreensão em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e incentivando;

Muito Obrigada!!!



## RESUMO

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

### DINÂMICA DO ARMAZENAMENTO E DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM ARGISSOLO SOB EUCALIPTO E CAMPO NATIVO

AUTORA: JULIANA PREVEDELLO  
ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT  
Local e data de defesa: Santa Maria, 02 de março de 2012.

A crescente demanda por produtos florestais tem propiciado o aumento das áreas com florestas plantadas no Brasil. O eucalipto é uma espécie florestal de rápido crescimento e é cultivada em larga escala, porém tem gerado polêmica devido às controvérsias existentes sobre o seu efeito na dinâmica da água do solo onde são implantados. Com o objetivo de avaliar o efeito que a substituição do campo nativo pelo eucalipto provoca nas propriedades físico-hídricas do solo, na infiltração, no armazenamento e na disponibilidade de água de um Argissolo de textura franco arenosa, realizou-se um estudo no município de Santa Maria, na Estação Experimental da FEPAGRO FLORESTAS. Foram utilizadas quatro áreas: povoamento florestal de *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden, de 3 - 4 anos de idade; campo nativo 1; povoamento florestal de *Eucalyptus saligna* Smith de 5 - 6 anos de idade; campo nativo 2. Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m de profundidade, para determinar a densidade, a distribuição de poros, a permeabilidade ao ar, a condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água. O conteúdo de água do solo foi monitorado continuamente até a profundidade de 0,80 m, utilizando-se um TDR automatizado. A substituição do campo nativo pelo cultivo do eucalipto não altera negativamente a densidade, a macroporosidade, a microporosidade e a porosidade total, a condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade do solo ao ar. O uso do solo sob campo nativo e eucalipto contribuem para a melhoria da qualidade estrutural, pois favorecem a formação de poros contínuos, importantes para uma adequada aeração, retenção e condução de água. O efeito antrópico derivado da substituição da vegetação nativa, o campo nativo, por povoamentos de eucalipto não altera significativamente a capacidade de armazenamento de água no solo e não reduz a quantidade de água disponível às plantas. Do total de água armazenada nas áreas de campo nativo e de eucalipto, 69 e 63 %, respectivamente, encontram-se na faixa potencial extraível às plantas, ou seja, prontamente disponível para o seu aproveitamento. O solo de textura franco arenosa, ao longo do ano, não sofre efeito adverso sobre o regime hídrico em função do florestamento com eucalipto em comparação com a vegetação de campo nativo e, portanto, não ocorre esgotamento da água do solo em locais com monocultivo de eucalipto.

**Palavras-chave:** retenção de água, aeração do solo, florestas plantadas, água disponível, propriedades físicas.



## ABSTRACT

Doctorate Thesis  
Post-Graduate Program in Forest Engineering  
Federal University of Santa Maria

### DYNAMICS OF STORAGE AND AVAILABILITY OF WATER IN ALFISOL UNDER EUCALYPTUS AND NATURAL GRASSLAND

AUTHOR: JULIANA PREVEDELLO

ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT

Date and Place of the Defense: Santa Maria, March 02, 2012.

The growing demand for forest products has enabled the increase in areas planted to trees in Brazil. Eucalyptus is a fast growing tree species being cultivated on a large scale; however, there is a controversy about the role of this plant on the dynamics of water in the soil where they are grown. In order to evaluate the effect that the replacement of native eucalypt causes the hydro-physical properties of soil, in infiltration, in storage and water availability in a sandy loam Alfisol, a study was conducted in the city of Santa Maria, in Experiment Station of FEPAGRO FORESTS. The forest was delineated into four areas: plantations of *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden. 3 to 4 years of age, natural grassland 1, plantations of *Eucalyptus saligna* Smith 5 to 6 years of age, natural grassland 2. Soil samples were collected with preserved structure in layers of 0.00 to 0.10, 0.10 to 0.20, 0.20 to 0.30, 0.30 to 0.40 and from 0.40 to 0.50 m depth to determine the bulk density, pore size distribution, air permeability, saturated hydraulic conductivity and water retention curve. The soil water content was continuously monitored to 0.80 m depth, using an automated TDR. The substitution of natural grassland by eucalypt plantations do not negatively alter the bulk density, macroporosity, microporosity and total porosity, hydraulic conductivity of saturated soil and soil permeability to air. The soil use under natural grassland and eucalyptus contribute to the improvement of structural quality, because they favor the formation of continuous pores, important for an adequate aeration, water retention and conduction. The anthropic effect derived from the natural vegetation substitution, the natural grassland by eucalyptus plantations does not significantly alter the capacity of water storage in soil and does not reduce the amount of water available to plants. The total of water stored in the areas of natural grassland and eucalyptus, 69 and 63%, respectively, are in the range potential extracting plants, other words, readily available for utilization. The soil with sandy loam texture, along the year, suffers no adverse effect on water regime as a function of eucalyptus forestation compared to natural grassland and therefore, there is no exhaustion of soil water in places with eucalyptus monoculture.

**Keys words:** water retention, soil aeration, planted forest, water available, physical proprieties.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Áreas com florestas plantadas no Brasil, no ano de 2010.....	30
Tabela 2– Caracterização granulométrica das camadas de solo nos povoamentos de <i>Eucalyptus grandis</i> , campo nativo 1, <i>Eucalyptus saligna</i> e campo nativo 2. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	49
Tabela 3 – Características do povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> Will ex Maiden. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	51
Tabela 4 – Características do povoamento de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.....	53
Tabela 5 – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (Pt) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) para as áreas e camadas de solo avaliadas. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	64
Tabela 6 – Correlação de Pearson entre a condutividade hidráulica do solo saturado com a densidade, porosidade total e classes de tamanho de poros. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.....	68
Tabela 7 - Permeabilidade do solo ao ar ( $\mu\text{m}^2$ ) de amostras equilibradas em diferentes potenciais ( $\Psi$ ) nos diferentes usos e camadas do solo avaliadas. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	74
Tabela 8 – Correlação de Pearson entre a permeabilidade ao ar (Kar) em diferentes potenciais e as diferentes classes de diâmetros de poros do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.....	75
Tabela 9 - Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) obtida pela curva de retenção de água no solo para os diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	82
Tabela 10 – Valores de armazenamento de água disponível (AD) e quantidade total de água armazenada (QTA) nos diferentes usos do solo avaliados, na camada de 0 a 0,50 m. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	83



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do Ciclo Hidrológico.....	36
Figura 2 – Localização do município de Santa Maria no Estado do Rio Grande do Sul.....	47
Figura 3 – Disposição geográfica dos pontos de estudo na área experimental. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil. ....	50
Figura 4 – Tratamentos avaliados. EG = <i>Eucalyptus grandis</i> Will ex Maiden. de 3 - 4 anos de idade; CN1 = campo nativo 1; ES = <i>Eucalyptus saligna</i> Smith de 5 - 6 anos de idade; CN2 = campo nativo 2. ....	52
Figura 5 – Sistema automático de monitoramento da umidade do solo. 1: Placa solar; 2: teclado programador; 3: Datalogger; 4: TDR-100; 5: Bateria; 6: Multiplexador e as 8 sondas conectadas. ....	57
Figura 6 – Canais abertos para instalação das sondas (a e b); Sonda sendo introduzida no canal com ajuda de um cano de alumínio (c e d); sonda já instalada verticalmente dentro do canal (e); Fechamento do canal com compactação do solo para evitar ocorrência de fluxo preferencial da água da chuva (f).....	58
Figura 7 – Permeâmetro para a medida do fluxo de ar em amostras indeformadas de solo. ....	59
Figura 8 – Permeâmetro de carga variável utilizado para a medida do fluxo de água nas amostras indeformadas de solo. ....	61
Figura 9 – Distribuição do diâmetro de poros nos diferentes usos e camadas do solo avaliadas.....	70
Figura 10 - Regressões lineares entre a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) com a macroporosidade (a), porosidade total do solo (b), com a densidade do solo (c) e diâmetro de poros maiores que 300 $\mu m$ e diâmetro de poros de 50 – 300 $\mu m$ (d).....	72
Figura 11 – Relação entre a permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ) e o espaço aéreo ( $E_a$ ) do solo para os diferentes usos do solo e camadas avaliadas. ....	77

Figura 12 - Curvas de retenção de água no solo do sítio 1. ....	79
Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo do sítio 2.....	81
Figura 14 - Umidade volumétrica no Verão nas camadas de (a) 0,00 – 0,20 m e (b) 0,20 – 0,40 m para os diferentes usos do solo. ....	87
Figura 15 - Umidade volumétrica no Verão nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo. ....	88
Figura 16 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Verão de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.....	89
Figura 17 - Umidade volumétrica no Outono nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo. ....	93
Figura 18 - Umidade volumétrica no Outono nas camadas de (a) 0,40 – 0,60 m e (b) 0,60 – 0,80 m para os diferentes usos do solo. ....	94
Figura 19 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Outono de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.....	95
Figura 20 - Umidade volumétrica no Inverno nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo. ....	98
Figura 21 - Umidade volumétrica no Inverno nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo. ....	99
Figura 22 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Inverno de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.....	100
Figura 23 - Umidade volumétrica na Primavera nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo.....	103
Figura 24 - Umidade volumétrica na Primavera nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo.....	104
Figura 25 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica na Primavera de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.....	105

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>2 HIPÓTESES.....</b>	<b>24</b>
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 Objetivo geral .....	27
3.2 Objetivos específicos.....	27
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Cultivo do eucalipto no Brasil.....</b>	<b>29</b>
4.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex-Maiden .....	32
4.1.2 <i>Eucalyptus saligna</i> Smith .....	32
<b>4.2 O ciclo hidrológico e a dinâmica da água no solo .....</b>	<b>33</b>
4.2.1 Importância da água.....	33
4.2.2 O ciclo hidrológico .....	35
4.2.3 A dinâmica da água no solo .....	38
<b>4.3 Propriedades físicas do solo associadas à dinâmica da água .....</b>	<b>42</b>
4.3.1 Densidade e porosidade do solo .....	42
4.3.2 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	43
4.3.3 Curva característica de água no solo e permeabilidade do solo ao ar .....	45
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
5.1 Área de estudo .....	47
5.2 Clima.....	48
5.3 Vegetação .....	48
5.4 Solo.....	48
<b>5.5 Descrição das áreas de estudo.....</b>	<b>50</b>
5.5.1 Sítio 1 .....	51
5.5.2 Sítio 2 .....	53
<b>5.6 Coleta das amostras de solo.....</b>	<b>54</b>
<b>5.7 Propriedades físicas do solo.....</b>	<b>55</b>
5.7.1 Densidade do solo, porosidade e curva de retenção de água.....	55
5.7.2 Análise granulométrica do solo .....	56
5.7.3 Umidade e armazenamento de água no solo.....	56
5.7.4 Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade do solo ao ar .....	59
5.7.5 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	61

<b>5.9</b>	<b>Análise estatística.....</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Densidade do solo e distribuição do tamanho de poros .....</b>	<b>63</b>
<b>6.2</b>	<b>Condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar .....</b>	<b>67</b>
<b>6.3</b>	<b>Curva de retenção de água no solo .....</b>	<b>78</b>
<b>6.4</b>	<b>Retenção e dinâmica da água no solo .....</b>	<b>84</b>
6.4.1	Retenção e dinâmica da água no solo durante o Verão de 2010 .....	84
6.4.2	Retenção e dinâmica da água no solo durante o Outono de 2010 .....	90
6.4.3	Retenção e dinâmica da água no solo durante o Inverno de 2010 .....	96
6.4.4	Retenção e dinâmica da água no solo durante a Primavera de 2010.....	101
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos florestais tem proporcionado o aumento das áreas com florestas plantadas no Brasil, onde as condições climáticas são favoráveis para o cultivo da cultura, o material genético disponível é de alta qualidade e a tecnologia de implantação, condução e colheita desses povoamentos florestais possui alta eficiência. Isso tudo, reduz o ciclo de cultivo do eucalipto, colocando o produto final em menos tempo no mercado. De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2011), a área ocupada por plantios florestais no Brasil totalizou, em 2010, 6.510.693 ha, sendo 73 % dessa área com plantios do gênero *Eucalyptus* e 27 % com plantios de *Pinus*.

A maior concentração de plantios florestais ocorre nas regiões sul e sudeste do país (75,2 %), visto que são as regiões onde estão localizadas as principais unidades industriais dos segmentos de celulose, de papel, de painéis de madeira industrializada, de siderurgia e de carvão vegetal. O Rio Grande do Sul é o sexto Estado com maior área de florestas plantadas (441.997 ha), sendo que ocupa a quinta posição entre os Estados que mais cultivam eucalipto no país, com 5,74 % dos plantios (ABRAF, 2011). Em decorrência da potencialidade de expansão do setor florestal e buscando regiões pioneiras para o florestamento, a Metade Sul do Rio Grande do Sul, compreendendo 61% da área territorial do estado, passou a ser alvo de especulações em relação à potencialidade de cultivar espécies florestais. Entretanto, possui limitações de ordem climática ou devido aos solos inadequados, principalmente por serem excessivamente.

A busca de novas áreas para a produção de alimentos, fibras e produtos florestais, causa desequilíbrio no ambiente pela retirada da vegetação natural. Segundo Araújo et al. (2007), a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas, pastagens e espécies florestais de rápido crescimento altera as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Essas alterações podem causar impactos negativos ao solo, levando à redução da produtividade das culturas, principalmente por aumentar a densidade, a resistência do solo à penetração de raízes, a redução da porosidade e, conseqüentemente, a redução da capacidade de aeração e do armazenamento de água no solo. Entretanto, os impactos que essas alterações provocam no solo ainda são pouco conhecidos em ambientes florestais,

fazendo-se necessário estudar a intensidade e as causas dessas variações em função das condições de clima, espécie vegetal e do tipo de solo.

O eucalipto é uma espécie florestal de rápido crescimento e, por isso, é a principal espécie cultivada em diversos países e, sobretudo, no Brasil. No entanto, existem controvérsias sobre o real efeito do eucalipto em relação ao uso e a disponibilidade de água no solo onde são plantados (ALMEIDA; SOARES, 2003). Segundo Oleriano e Dias (2007), a maior demanda de água ocorre, principalmente, na fase inicial de crescimento das espécies florestais e essa necessidade de água depende das condições locais, como o tipo de solo, a quantidade e o regime de precipitação anual, além de ser influenciado pelas práticas de manejo do solo e da espécie cultivada (MENDES; LIMA, 2007). Além disso, Lima (1996) descreve que o sistema radicular da maioria das espécies de eucalipto é bem distribuído no perfil e as raízes mais finas, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, se concentram nas camadas superficiais do solo, as quais conseguem suprir as necessidades hídricas das plantas, uma vez que são frequentemente recarregadas pela precipitação. Lima (1990) e Lima (1996) relatam que, quando o conteúdo de água dessa camada diminui, ocorre redução proporcional do uso da água do solo, caracterizada pela redução da transpiração das árvores.

O teor de água controla a aeração, a temperatura e a resistência mecânica ao crescimento radicular, os quais são afetados pela densidade do solo e pela distribuição do tamanho de poros. Esses fatores físicos interagem e regulam o crescimento e a funcionalidade das raízes, baseados em limites críticos associados ao ar, à água e à resistência do solo, com reflexos na produtividade dos cultivos (REICHERT et al., 2003). As propriedades físicas são facilmente alteradas pelo uso e manejo dos solos e são dependentes da classe textural. Assim, a intensidade com que as mesmas serão afetadas varia com a composição granulométrica dos solos. Solos de textura média a arenosa possuem baixa resiliência, o que confere maior fragilidade para suportar as forças de degradação, porém, quando manejados adequadamente se degradam e se recuperam mais rapidamente que os solos argilosos (REINERT, 1998).

Uma das principais limitações ao uso agrícola dos solos arenosos, citadas por Reinert (1998), refere-se à sua menor capacidade de armazenar e fornecer água às plantas. As características intrínsecas dos solos como a textura, estrutura e teor de matéria orgânica regulam a capacidade de armazenamento de água por unidade de

volume de um solo. O consumo de água pelas plantas depende das condições meteorológicas, do potencial total de água no solo e das características das plantas, tais como a área foliar, a altura das plantas e a distribuição e funcionalidade do sistema radicular. Assim, Carlesso et al. (1999), estudando o efeito da textura do solo sobre a capacidade de armazenamento de água disponível para o milho, verificou que, em solo franco arenoso, a quantidade total de água armazenada é menor, porém, quase a totalidade armazenada (78 %) é disponível para a cultura do milho, ao passo que em solo de textura argilosa apenas 43 % encontra-se disponível para as plantas.

A água é o fator fundamental na produção vegetal, a sua falta ou excesso afetam de forma decisiva o desenvolvimento das plantas. O reservatório temporário de água é o solo, e o mesmo armazena e a disponibiliza às plantas conforme duas necessidades (REICHARDT; TIMM, 2004). Assim, estudos conduzidos com o objetivo de monitorar o conteúdo de água no solo e a sua disponibilidade em áreas cultivadas com plantios homogêneos de eucalipto, em comparação com áreas de vegetação nativa, são imprescindíveis para o entendimento da dinâmica da água no solo, sobretudo devido ao aumento das áreas cultivadas com esta espécie nos mais variados ecossistemas, além da importância socioeconômica nas regiões onde é implantada.



## 2 HIPÓTESES

- 1) A substituição do campo nativo pela implantação de povoamentos florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* promovem alterações na densidade, na porosidade, na condutividade hidráulica do solo saturado e na permeabilidade do solo ao ar em um Argissolo de textura franco arenosa.
  
- 2) O efeito antrópico derivado da substituição da vegetação nativa por povoamentos florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* alteram a capacidade de armazenamento e a quantidade de água disponível no solo para as plantas.



## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da substituição da vegetação de campo nativo pelo cultivo povoamentos florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* em diferentes estádios de desenvolvimento, nas propriedades físico-hídricas, no armazenamento e na disponibilidade de água no solo às plantas.

### 3.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar a distribuição e o armazenamento de água no perfil do solo por meio do monitoramento contínuo da umidade em áreas de *Eucalyptus grandis* com 3 anos de idade, de *Eucalyptus saligna* com 5 anos de idade e em vegetação de campo nativo, ao longo das quatro estações do ano;
- 2) Avaliar os efeitos da substituição do campo nativo pelo cultivo de povoamentos florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* em um Argissolo de textura franco arenosa, através de algumas propriedades físicas, como a densidade, a distribuição do sistema poroso, a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade do solo ao ar;
- 3) Avaliar as consequências da substituição da vegetação de campo nativo pelo cultivo com espécies do gênero *Eucalyptus*, no armazenamento e nos limites superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente) de disponibilidade de água em um Argissolo.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Cultivo do eucalipto no Brasil

O gênero *Eucalyptus* é derivado do grego (“*eu*” significa “boa” e “*Kalyptós*” significa cobertura, ou seja, “boa cobertura”). Pertence à família das mirtáceas, as quais são plantas lenhosas, arbustivas ou arbóreas, e encontram-se distribuídas pelas regiões tropicais e subtropicais do mundo. O Serviço Florestal da Austrália já identificou 670 espécies do gênero *Eucalyptus* (SILVA, 2001). Dentre estas, somente duas espécies não são originárias da Austrália (*E. urophylla* e *E. deglupta*). A maioria das árvores é típica de florestas altas, atingindo alturas que variam de 30 a 50 metros, e de florestas abertas, com árvores menores, as quais atingem de 10 a 25 metros de altura. Cerca de 30 a 40 espécies são arbustivas. As principais espécies plantadas no mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulenses*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora*.

Após a espécie ser descoberta pelos ingleses na Austrália, em 1788, as sementes de eucalipto sofreram disseminação no mundo todo, já no início do século XIX. Na América do Sul, o primeiro país a introduzir o eucalipto foi o Chile, em 1823 e, posteriormente, a Argentina e o Uruguai. No Brasil, os primeiros plantios de eucalipto iniciaram no século XX, porém, apenas com função paisagística ou como quebra-ventos, devido ao seu rápido desenvolvimento e propriedades sanitárias (ANDRADE, 1961).

A introdução da cultura do eucalipto em projetos de reflorestamento teve início em 1904, pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, para ser usado como dormentes, postes e lenha (MORA; GARCIA, 2000). De 1909 até 1966, haviam sido plantados somente 470.000 hectares de eucalipto em todo o Brasil, sendo 80 % em áreas do Estado de São Paulo. Em 1966, uma intensa política de incentivos fiscais para o reflorestamento (que perdurou por 24 anos), voltadas para as grandes indústrias siderúrgicas e de papel e celulose das regiões Sul e Sudeste do Brasil, alavancou o plantio de eucalipto em larga escala no Brasil. De acordo com a FAO (1981), em 1973 o Brasil já era o maior produtor mundial em extensão de áreas plantadas com eucalipto, com mais de 1 milhão de hectares e, na mesma

época, as plantações mundiais de eucalipto eram de apenas 4 milhões de hectares.

Em 2001, as plantações de eucalipto ocupavam aproximadamente três milhões de hectares em todo Brasil, localizados, em sua maior parte, na região Sudeste e no Estado da Bahia. No ano de 2010, o Brasil totalizou uma área de 6,97 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 4,75 milhões com eucalipto, 1,80 milhões com pinus e 462 mil de outras espécies, ocupando apenas 0,7 % do território nacional (ABRAF, 2011). O Rio Grande do Sul é o sexto Estado com maior área territorial cultivada com florestas e, o quinto em plantios com eucalipto, com 273 mil hectares, representando um percentual de 5,74 % do total dos plantios no país (Tabela 1).

Tabela 1 – Áreas com florestas plantadas no Brasil, no ano de 2010.

<b>Estado</b>	<b>Eucalipto (ha)</b>	<b>Pinus (ha)</b>	<b>Total (ha)</b>
Minas Gerais	1.400.000	136.310	1.536.310
São Paulo	1.044.813	162.005	1.206.818
Paraná	161.422	686.509	847.931
Bahia	631.464	26.570	658.034
Santa Catarina	102.399	545.592	647.992
Rio Grande do Sul	273.042	168.955	441.997
Mato Grosso do Sul	378.195	13.847	392.042
Espírito Santo	203.885	3.546	207.431
Maranhão	151.403	0	151.403
Pará	148.656	0	148.656
Goiás	58.519	12.160	70.679
Mato Grosso	61.950	0	61.950
Amapá	49.369	15	49.384
Tocantins	47.542	850	48.392
Piauí	37.025	0	37.025
Outros	4.650	0	4.650
<b>Total</b>	<b>4.754.334</b>	<b>1.808.336</b>	<b>6.510.693</b>
<b>Outras espécies</b>			<b>462.390</b>
<b>TOTAL</b>			<b>6.973.083</b>

Fonte: Abraf (2011).

Dentre as inúmeras espécies arbóreas existentes, o eucalipto tem sido extensivamente utilizado em plantios florestais por apresentar rápido crescimento,

alta produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicação para diversas finalidades. Além disso, as condições climáticas favoráveis e a capacidade tecnológica das empresas responsáveis pela silvicultura nacional, tem tornado o setor florestal brasileiro bastante significativo, ocupando hoje posição de destaque na produção e exportação de produtos de base florestal a partir de plantações de eucalipto (ABRAF, 2011).

Embora o eucalipto seja uma essência florestal exótica, a zona ecológica de sua cultura torna-se muito extensa em consequência do grande número de espécies. Dessa maneira, em todo o país, o plantio tornou-se perfeitamente exequível, sob o ponto de vista econômico. O gênero *Eucalyptus*, devido à diversidade de espécies, possui uma ampla gama de adaptação edafoclimática, podendo ser encontradas espécies que se adaptem bem em climas com temperaturas que vão de 18°C negativos até 35°C positivos e em diversos tipos de solos, desde arenosos e secos até solos hidromórficos (SILVA, 2001).

O manejo e o ciclo de cultivo do eucalipto variam em função do produto final desejado. Quando a finalidade da madeira é celulose, papel, carvão, lenha, paletes e caixotaria, a cultura será submetida a um ciclo curto e, nesse caso, a colheita é realizada entre 7 e 10 anos após o plantio. Para esse produto final, a área pode ser manejada em mais duas rebrotas até que se faça a extinção do plantio atual e replantio de novas árvores. Para a produção de madeira destinada à movelaria, construção civil e outros fins, que necessitam madeira com diâmetro maior, o ciclo será longo, entre 14 e 25 anos. Essa variação no tempo de cultivo é função da finalidade do produto, do sistema de cultivo, espaçamento e adubação, clima e solo, entre outros fatores (SCARPINELLA, 2002).

Atualmente, as empresas do setor florestal brasileiro têm apresentado desenvolvimento considerável, através do uso de novas tecnologias e o melhoramento genético, visando o aumento da produtividade florestal. A produtividade do eucalipto varia de 38 a 53 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (STAPE, 2008). Segundo o autor, esta alta produtividade das florestas brasileiras deve-se às condições favoráveis de solo e de clima e ao alto nível tecnológico da silvicultura.

Dentre as espécies mais cultivadas no Brasil destacam-se o *E. grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla*, representando, respectivamente, 55, 17 e 9 % da área de florestas comerciais no país, o que equivale a 81 % do total da área cultivada com o gênero (SILVA, 2001).

#### 4.1.1 *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden

A espécie é natural da Austrália e ocorre em três populações distintas: ao redor do Estado de New South Wales e em direção ao norte de Bundaberg (Latitude de 25 a 33° S); em pequenos povoados na parte central de Queensland (Latitude de 21° S); e ao norte de Queensland (Latitude de 16 a 19° S). Esta espécie é adaptada a altitudes que variam deste o nível do mar até 1100 m, nas áreas mais ao Norte. O clima nessas regiões é principalmente quente e úmido, com precipitações que variam de 1.000 a 3.500 mm. A temperatura máxima entre 24 e 30° C e, a mínima entre 3 e 8° C (IPEF, 2011).

A espécie é naturalmente de floresta aberta alta. São árvores altas (45 a 55 m de altura) e grossas, com diâmetro à altura do peito (dap) de 1,2 a 2 m. Podendo excepcionalmente, atingir 75 m de altura e 3 m de dap. Geralmente com fuste liso nos 2/3 ou 3/4 superiores do tronco (IPEF, 2011).

No Brasil, o *E. grandis* é a espécie mais cultivada. É sensível à geadas severas e relativamente resistente à deficiência hídrica. Sua madeira é leve e fácil de ser trabalhada, sendo intensivamente utilizada na construção civil, pois produz madeira excelente para serraria e laminação, quando oriunda de plantações de ciclo longo. Quando manejada em ciclos curtos, é a principal fonte de matéria-prima para celulose e papel, painéis, aglomerados, chapas duras, lenha, caixotaria, entre outros fins. A sua madeira apresenta maior resistência que o *E. saligna*, mas menor resistência que o *E. urophylla*. (SCARPINELLA, 2002).

#### 4.1.2 *Eucalyptus saligna* Smith

De ocorrência natural na Austrália, a espécie é encontrada principalmente na região litorânea e vales das cadeias montanhosas próximas ao litoral de *New South Wales*, além da região sul de *Queensland*, nas Latitudes entre 21° e 36° S, com altitudes variando desde o nível do mar até 1100 m. O clima é principalmente quente

e úmido, com média das temperaturas máximas do mês mais quente entre 24° e 33° C, e a mínima do mês mais frio está entre -2° e 8° C. A precipitação anual varia de 900 a 1800 mm, mais concentrada no verão, porém, o período seco não ultrapassa 4 meses (IPEF, 2011).

A espécie é de floresta aberta alta; portanto, são árvores de tamanho alto a muito altas, atingindo de 30 a 55 m de altura e mais de 2 m de Dap. Excepcionalmente, pode atingir mais de 65 m de altura e 2,5 m de Dap. Apresenta excelente forma do fuste. A copa alcança 1/2 a 1/3 da altura total da árvore. O melhor desenvolvimento é atingido em solos franco-arenoso, porém apresenta bom crescimento em Latossolos profundos e bem drenados (IPEF, 2011).

A madeira desta espécie é muito semelhante à do *E. grandis*, mas apresenta maior densidade. Portanto, é indicada para diversos usos: laminação, móveis, estruturas, caixotaria, postes, moirões, celulose e carvão.

No Brasil, é a segunda espécie de eucalipto mais cultivada, porém apresenta suscetibilidade às geadas severas, o que limita seu cultivo em diversas regiões. Apresenta alta capacidade de regeneração por brotação das cepas, tornando a espécie economicamente atrativa.

## **4.2 O ciclo hidrológico e a dinâmica da água no solo**

### **4.2.1 Importância da água**

A água é um componente fundamental da dinâmica da natureza, pois impulsiona todos os ciclos, sustenta a vida e é um solvente universal. A água é o recurso vital para qualquer atividade que o homem realize, pois, além de ser imprescindível para suas funções vitais diárias, utiliza os recursos hídricos para outras atividades, tais como: produção de energia e alimentos, navegação, desenvolvimento industrial, agrícola e econômico.

A Terra pode ser chamada de planeta da água, pois possui cerca de 71% da sua superfície coberta por água. Entretanto, sabe-se que 97% dessa água não encontra-se disponível para o consumo humano, pois constituem as águas salgadas

dos mares e oceanos; dessa forma, somente 3% são as águas doces. A grande maioria da população acredita que a água é infinitamente abundante e sua renovação é natural. No entanto, do total de água doce, a maior parte, cerca de 3 % está nas geleiras e calotas polares (água em estado sólido), deixando disponível menos de 1 % para o consumo humano, em lagos, aquíferos e rios de água doce de acesso fácil. Em escala global, estima-se que 1,386 bilhões de km<sup>3</sup> de água estejam disponíveis, porém a parte de água doce de fácil aproveitamento para satisfazer as necessidades humanas é de aproximadamente 14 mil km<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (0,001%) (PNUD, 2006).

Anualmente, aproximadamente 47 mil km<sup>3</sup> de água retornam aos oceanos a partir dos rios, represas, lagos e águas subterrâneas. Se essa drenagem fosse distribuída igualmente em todos os continentes, cada uma das pessoas ou habitantes do planeta Terra (aproximadamente 7 bilhões) teria disponíveis 7 mil m<sup>3</sup>/ano. Entretanto, esta distribuição é desigual, devido a problemas de disponibilidade nos continentes, países e regiões. Além disso, a distribuição não é homogênea durante o ano em muitas regiões, o que resulta em desequilíbrio e desencadeia ações de gerenciamento diversificadas para enfrentar a escassez ou o excesso de água (PIELOU, 1998). A América Latina, por exemplo, dispõem de 31% dos recursos universais de água doce. Alguns países, como o Brasil e o Canadá, dispõem de mais água do que conseguem consumir, porém alguns países do Oriente Médio possuem muito menos do que a demanda populacional (PNUD, 2006).

Atualmente, este recurso natural encontra-se cada vez mais limitado e está sendo exaurido pelas ações impactantes nas bacias hidrográficas, degradando a sua qualidade e prejudicando os ecossistemas. Estima-se que a carência de água poderá ser um dos fatores limitantes de desenvolvimento para muitos países. A falta de água já atinge severamente 26 países, tais como: Israel, Territórios Palestinos, Jordânia, Líbia, Malta, Tunísia, Arábia Saudita, Iraque, Kuwait, Egito, Argélia, Burundi, Cabo Verde, Etiópia, Cingapura, Tailândia, Barbados, Hungria, Bélgica, México, Estados Unidos, França, Espanha e outros. No Brasil, a ocorrência mais frequente de seca é no Nordeste e problemas sérios de abastecimento em outras regiões já são identificados e conhecidos (PNUD, 2006).

A civilização moderna é caracterizada por alta demanda de água, porém a quantidade de água disponível para as necessidades vitais é relativamente pequena.

Mas, mesmo nas sociedades mais simples, as pessoas precisam de uma quantidade adicional de água para as necessidades diárias. No passado, o consumo "per capita" diário, considerando todos os usos, variava de 12 a 20 litros, porém, nos dias atuais, o consumo aumentou para aproximadamente 300 litros por dia. Computados todos os fatores de produção, como o uso doméstico, irrigação, industrial, agricultura, o consumo passa de 15.000 litros por pessoa por dia. Além disso, a demanda de água aumenta com o aumento de população e com a melhoria do padrão de vida (LIMA, 2008).

Na maioria dos países, a agricultura é caracterizada como a atividade que mais consome água, com mais de quinhentos litros por pessoa ao dia. De 1900 até os nossos dias, a superfície cultivada com irrigação triplicou e, nesses sistemas tradicionais de irrigação, somente 40% do total da água utilizada é aproveitada, o restante é evaporado ou é perdido. Uma floresta, por outro lado, consome cerca de 200 a 1.000 l/m<sup>2</sup>/ano (200 a 1000 mm) de superfície, para a produção de aproximadamente 1 a 2 kg de matéria seca/m<sup>2</sup>/ano. Portanto, a relação transpiração/biomassa seca varia de 100 a 1.000 l/m<sup>2</sup>/ano, dependendo do clima, do tipo florestal e da disponibilidade de água (LIMA, 2008).

#### 4.2.2 O ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar; assim, a água não se perde no sistema, ela é constantemente transferida entre os compartimentos do sistema e renovada.

As principais fases do ciclo hidrológico são: a evaporação, a precipitação, a interceptação, o escoamento superficial, a transpiração das plantas, a infiltração e a drenagem da água no solo (Figura 1).

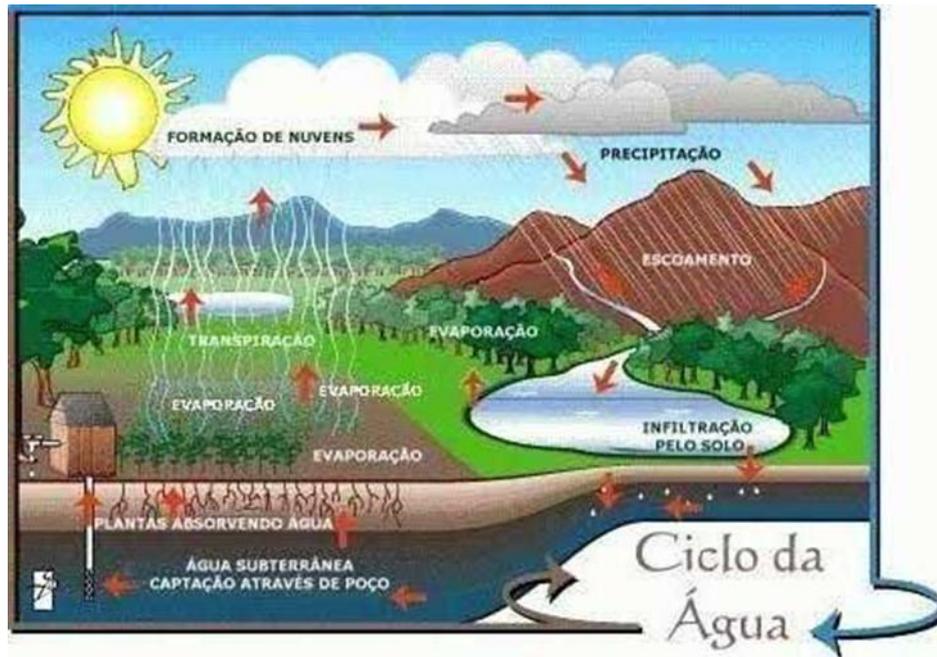


Figura 1 - Representação esquemática do Ciclo Hidrológico.

Fonte: <http://abadiaedna2011.blogspot.com/2011/02/ciclo-da-agua.html> (Acesso em 26/05/2011).

Esse ciclo envolve diversos processos hidrológicos e é influenciado diretamente por inúmeros fatores, sendo a vegetação um dos principais, pois interfere na dinâmica e na manutenção dos aquíferos, através dos processos de interceptação, condensação, precipitação, evapotranspiração, infiltração e percolação, escoamentos superficiais e subsuperficiais (KOBAYAMA, 1999). Balbinot et al. (2008) relatam que a presença da floresta desempenha papel importante na distribuição da energia e da água na superfície do solo, influenciando nos processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão.

A interceptação das chuvas é um dos efeitos mais significativo das florestas dentro do ciclo hidrológico, onde a precipitação incidente é redistribuída pela copa das árvores e parte é perdida por evaporação direta da água interceptada (LIMA, 1996). Ainda segundo o autor, em florestas temperadas, onde as chuvas geralmente são de baixa intensidade e prolongadas, a interceptação é maior. Entretanto, em regiões tropicais, onde as chuvas são intensas e geralmente de curta duração, a interceptação é menor. Dessa forma, a quantidade de água interceptada está diretamente relacionada com a “capacidade de armazenamento de copa”, sendo dependente da área foliar das espécies florestais.

Além do efeito da interceptação de parte de água da chuva, ocorre também o

efeito da desaceleração da água da chuva que chega até a superfície do solo, reduzindo a força do impacto das gotas, o que reduz o escoamento superficial e favorece a infiltração de água no perfil do solo. Assim, quando se comparam os efeitos do florestamento em áreas de campo nativo, ou de pastagem, ou qualquer outra área de vegetação aberta, provavelmente ocorre uma redução da produção de água na bacia hidrográfica, de aproximadamente 20 %, enquanto que as perdas evaporativas da bacia poderiam, eventualmente, quase que duplicar devido às perdas evaporativas pelo processo de interceptação das chuvas pela copa da floresta (LIMA, 1996).

A energia solar ao incidir sobre a superfície terrestre provoca o aquecimento, fazendo com que a água em seu estado líquido sofra o processo de evaporação, a qual passa para a atmosfera, sendo esse um fenômeno puramente físico. Nesse processo, a vegetação também participa através da transpiração e a combinação dos dois resulta na evapotranspiração, sendo esse um fenômeno físico-biológico. Nos oceanos, a evaporação é extremamente alta e o vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar e, em determinadas condições, é condensado, formando as nuvens (OLERIANO; DIAS, 2007). Após a condensação ocorre a precipitação, a qual é dispersa sob várias formas. A maior parte fica retida temporariamente no solo próximo de onde caiu e, finalmente, retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. A outra parte de água restante infiltra e penetra profundamente no solo, indo suprir o lençol d'água subterrâneo (VILLELA; MATTOS, 1975).

Dentre os vários processos que compõem o ciclo hidrológico, os fluxos de água no solo, tais como a infiltração, redistribuição, evaporação e absorção de água pelas plantas, são processos interdependentes e, na maioria das vezes, ocorrem simultaneamente. Rossato (2001) explica que, para estudar o ciclo da água, é preciso considerar o balanço hídrico que ocorre no volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas. O balanço hídrico nada mais é que o somatório das quantidades de água que entram e saem do solo num determinado intervalo de tempo. Assim, a quantidade líquida de água que nele permanece ficará disponível para as plantas (REICHARDT, 1985).

#### 4.2.3 A dinâmica da água no solo

O solo é o armazenador e fornecedor de água e nutrientes às plantas e, através dos fenômenos de adsorção e capilaridade, ele a retém e a disponibiliza. O potencial de água no solo vai determinar se as plantas terão maior ou menor facilidade de extrair água para atender às suas necessidades, pois à medida que o solo seca, aumenta-se a força de retenção e diminui a disponibilidade hídrica no solo. Assim, nem toda a água armazenada no solo encontra-se disponível para as plantas (REICHARDT, 1990).

As características do solo e da água, os fenômenos de entrada de água pela superfície, bem como a transmissão através do perfil e a capacidade de armazenamento do solo definem a infiltração e o escoamento na superfície do terreno. Quando a camada superficial do solo sofre compactação, ocorre aumento da densidade e redução da porosidade total, principalmente da macroporosidade, mudança na distribuição do tamanho dos agregados e aumento na capacidade de adsorção de água pelo solo (REICHERT et al., 2009a; MAIA et al., 2005), fazendo com que a água penetre com maior dificuldade, mesmo que o perfil apresente condições favoráveis à infiltração, abaixo da camada compactada.

A composição granulométrica, a mineralogia e a área superficial específica das partículas que compõem o solo também influenciam na retenção de água, pois estão relacionadas ao estado de energia que a água fica retida no solo. De acordo com Hillel (1998), a composição granulométrica está intimamente correlacionada com a estrutura e a variação da área superficial específica, assim horizontes arenosos apresentam uma redução mais acentuada do conteúdo de água com o aumento das tensões aplicadas e retém menos água que solo argiloso, em virtude do espaço poroso ser composto principalmente por poros de diâmetros maiores e a área superficial específica das partículas serem menor, dificultando a retenção de água em potenciais maiores.

A quantidade de água disponível às plantas é tradicionalmente definida pela diferença entre a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (REICHARDT, 1990). A capacidade de campo é o limite superior de disponibilidade de água no solo, equivalente ao equilíbrio entre a força gravitacional (percolação de água) e a força de retenção desta água pelo solo, ou seja, é o teor

máximo de água que o solo pode reter contra a força da gravidade, sendo avaliado nos potenciais de -10 kPa para solos arenosos ou -33 kPa para solos argilosos. A quantidade de água no solo onde as plantas não conseguem mais extrair água e suas folhas atinge, pela primeira vez, um murchamento irreversível, é conhecida como o ponto de murcha permanente e é avaliado no potencial de -1500 kPa.

Entretanto, Letey (1985), Silva e Kay (1997) e Tormena et al. (1998) incluíram no conceito de água disponível, outras propriedades físicas do solo que afetam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, tais como: o suprimento de oxigênio, a porosidade mínima de aeração ou o espaço aéreo mínimo, a temperatura, a resistência mecânica à penetração e o conteúdo de água no solo. Dentre esses, a água tem papel fundamental, pois regula todos os outros fatores diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas, determinando a qualidade do solo.

A qualidade do solo tem sido definida como a capacidade do solo em sustentar a produtividade animal e vegetal, manter ou aumentar a qualidade da água e do ar em ecossistemas naturais ou antropizados, além de garantir a saúde humana (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1997). Segundo Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo pode ser quantificada através do monitoramento de mudanças que ocorrem no estado e na qualidade desse solo, a partir de algumas propriedades físicas, químicas e biológicas avaliadas a médio e longo prazo. Essas propriedades estão ligadas com a capacidade do solo funcionar como um meio para o crescimento das plantas, regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente, estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera e favorecer o processo de degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (KARLEN et al., 1997).

A estrutura, a distribuição do diâmetro dos poros, a textura, o tipo e a quantidade de argila e o teor de matéria orgânica são as principais características e propriedades físicas do solo que afetam a disponibilidade de água às culturas. Dentre essas, a estrutura é a propriedade manipulável e refere-se ao tamanho, à forma e ao arranjo dos sólidos e vazios, à continuidade e de poros, à sua capacidade de reter e transmitir fluidos e substâncias orgânicas e inorgânicas, bem como à habilidade de suportar o crescimento e desenvolvimento vigoroso de raízes (BRONICK; LAL, 2005). É, portanto, uma propriedade fundamental para que o solo tenha capacidade de cumprir suas funções e garantir sua qualidade (DORAN;

PARKIN, 1994). A rede de poros representa o sistema circulatório do solo e é responsável pelas trocas gasosas, transmissão e armazenamento de água, garantindo o crescimento e o desenvolvimento das plantas no ecossistema (KAISER, 2010).

Como reservatório de água para as plantas, o solo é facilmente afetado pelo manejo e por práticas culturais com consequente alteração da infiltração e da retenção de água, além do seu potencial produtivo (DIAS JÚNIOR, 1999). Um dos principais impactos negativos provocados pelo uso indiscriminado do solo são a compactação e os processos erosivos consequentes. A compactação, definida por Seixas (1988) e Camargo e Alleoni (1997) como a ação mecânica que resulta em redução do índice de porosidade, ou seja, relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos. Os espaços porosos perdidos sob o efeito da compactação são na maioria os macroporos, os quais são responsáveis pela movimentação de água e ar no solo, resultando em aumento da quantidade de microporos e, conseqüentemente, na maior retenção de água no solo, no entanto, não estando disponível às plantas.

A compactação do solo em decorrência do tráfego de máquinas, em áreas florestais, vem sendo frequentemente estudada e verifica-se que os danos causados em solos florestais diferem daqueles dos solos agrícolas devido à espécie cultivada, ao ciclo das culturas e às máquinas utilizadas (GREACEN; SANDS, 1980). Esses autores relatam que, o peso das árvores e das máquinas utilizadas no processo de colheita florestal contribuem para o aumento da compactação do solo. Nambiar (1981) afirma que, a compactação é o fator ambiental que mais influencia na profundidade de crescimento das raízes do eucalipto. Entretanto, Guerra et al. (1999) verificaram que, a compactação do solo somente afetou o crescimento do sistema radicular de mudas de *E. grandis* em condições de restrição de água no solo. Em condições de baixa umidade, ocorre um aumento acentuado na resistência mecânica do solo à penetração das raízes e, sob deficiência hídrica, não atingem turgor celular suficiente para proporcionar o alongamento das raízes na zona de crescimento, localizada um pouco acima da coifa.

O sistema radicular do eucalipto apresenta variações na distribuição de raízes finas no perfil do solo, sendo que a camada superficial acumula a maior parte (MARTINS et al., 2004; MELLO, 1997). Por serem mais finas e com mais pelos radiculares, facilitam o contato raiz-solo, tornando-as adaptadas fisiologicamente

para a absorção de água e nutrientes. Devido à maior parte do sistema radicular do eucalipto, responsável pela absorção de água e nutrientes se concentrar mais superficialmente no perfil do solo e serem bem distribuídos lateralmente, Lima (1996) afirma que, essas camadas são suficientes para suprir as necessidades de água às espécies de eucalipto. Incoll (1979) verificou que 98 % do peso seco do sistema radicular de uma floresta de *E. regans* de 29 anos de idade ocorriam nos primeiros 0,60 m do perfil do solo e que a raiz pivotante se estendia até 2,6 m de profundidade. Giordano (1969) apud Lima (1996) observou que a maior parte do sistema radicular de uma plantação de *E. globulus* com sete anos de idade desenvolvia-se nos primeiros 100 cm superficiais do solo e um crescimento máximo em profundidade alcançando 4 metros.

Em um sítio caracterizado por apresentar o nível do lençol freático a uma profundidade de aproximadamente 9 metros, Greenwood et al. (1982) observaram que a absorção de água pelo *E. wandoo* no sudoeste da Austrália restringia-se às camadas superficiais, não saturadas do perfil do solo e, não encontraram nenhuma raiz com grandes diâmetros em profundidades maiores de 1,2 metros, dessa forma, concluíram que a floresta não estava extraíndo quantidade apreciável de água do lençol freático. Lima e Reichardt (1977) explicam que a recarga de água do solo pelas chuvas, bem como a exaustão da água armazenada no solo pela evapotranspiração, define ao longo da camada superficial, um padrão anual de alta variabilidade do conteúdo de umidade, com flutuações de umedecimento e secagem do solo, reflexos da evapotranspiração pelas plantas, retenção e drenagem de água. E, além disso, essas camadas bastariam para abastecer as plantações florestais quanto às suas necessidades de água.

A comparação do efeito de diferentes espécies florestais sobre a variação da umidade do solo, superficial e subterrânea, fornece indicações sobre a transpiração comparativa das diferentes espécies vegetais, onde a maior demanda de água da transpiração é suprida pela umidade extraída das camadas superficiais do solo. E, à medida que o conteúdo de umidade dessa camada superficial diminui, ocorre uma diminuição proporcional da transpiração (LIMA et al., 1990; LIMA, 1996).

### 4.3 Propriedades físicas do solo associadas à dinâmica da água

#### 4.3.1 Densidade e porosidade do solo

As propriedades físicas do solo são de fundamental importância para a caracterização do mesmo quanto ao seu uso e manejo, e também são parâmetros que permitem inferir sobre os diversos fatores que atuam sobre o mesmo. Nesse contexto, a estrutura é um dos atributos mais importantes do solo sob o ponto de vista agrícola e florestal, tendo importante participação nas relações solo-planta. Essa é avaliada, geralmente, através da densidade e porosidade, devido à facilidade de coleta e por sofrerem pouca interferência do no momento da coleta das amostras de solo (REICHERT et al., 2003).

A densidade é um atributo que reflete primariamente o arranjo das partículas do solo, que por sua vez, define as características do sistema poroso (FERREIRA, 2010) e, frequentemente, é utilizada para identificar a compactação do solo (SÁ; SANTOS JUNIOR, 2005). Quando a densidade do solo sofre influência do uso e manejo, a distribuição das classes de poros também poderá ser modificada devido à relação intrínseca existente entre eles, ou seja, a proporção de macro e microporos serão alteradas e, conseqüentemente, as funções do solo de fornecer adequada aeração e quantidade de água suficiente para o crescimento e expansão radicular serão afetadas.

Para que o metabolismo vegetal não sofra alterações, são necessárias trocas gasosas entre as raízes e a atmosfera. Porém, a compactação do solo, ao provocar aumento da densidade, reduz a taxa de difusão de oxigênio nos poros junto ao sistema radicular das plantas, prejudicando o crescimento. Assim, para o adequado desenvolvimento das culturas, alguns autores citam que a porosidade de aeração mínima deva ser de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , pois abaixo desse valor ocorre redução da difusão do oxigênio no solo (XU et al., 1992; TORMENA et al., 1998; KLEIN; LIBARDI, 2002), prejudicando o desenvolvimento das culturas. Esta porosidade relaciona o volume de sólidos e de ar do solo, sendo, portanto, afetada pelo conteúdo de água e pela compactação (HILLEL, 1998).

Relacionar a densidade do solo com o crescimento das plantas é difícil, pois a

densidade é um atributo intrínseco e varia de solo para solo, principalmente em função da sua textura. Solos arenosos apresentam valores de densidade naturalmente superiores a solos argilosos (SÁ; SANTOS JUNIOR, 2005). Reichert et al. (2009a) sugerem valores de densidade crítica ao desenvolvimento das culturas anuais de 1,75, 1,45 e 1,30 Mg m<sup>-3</sup> para solos de textura arenosa, média e muito argilosa, respectivamente. No entanto, densidades críticas podem não afetar negativamente a produtividade das culturas, se o conteúdo de água retido for disponível para as plantas durante o ciclo de desenvolvimento e se o tamanho, a forma e a continuidade dos seus poros não limitarem a aeração, a infiltração e a penetração das raízes no solo.

#### 4.3.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

A cobertura vegetal e as práticas de uso e manejo do solo afetam as características hidráulicas que regulam o balanço hídrico. Dessa forma, alterações no uso do solo podem ter grandes impactos na disponibilidade de água para as plantas, recarga do nível freático, ocorrência de escoamento superficial e erosão. Estas alterações produzem efeitos diversos na estrutura do solo, por modificarem a distribuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, as propriedades hidráulicas e o transporte de água no solo. O comportamento do fluxo de água é determinado pela condutividade hidráulica, que mede a habilidade do solo em conduzir água, e as características de retenção de água no solo, ou seja, a sua habilidade em armazenar água (KLUTE; DIRKSEN, 1986).

A equação de Darcy, representa a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área através de um meio poroso, sendo proporcional ao gradiente hidráulico. Assim, a condutividade hidráulica caracteriza o movimento de água em meio poroso (CARVALHO, 2002), atingindo seu valor máximo quando o solo se encontra saturado, denominado por Reichardt (1990) de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ). O solo saturado conduz água por todos os vazios e o não saturado somente através dos filmes de água que envolve suas partículas; logo, o solo não saturado conduz menos água, devido à menor área útil condutora de água (GUERRA, 2000).

A  $k_{sat}$  é uma das propriedades físico-hídricas de maior relevância em estudos de movimento de água e solutos no solo, por fornecer, indiretamente, informações sobre a estrutura (KLUTE; DIRKSEN, 1986). Segundo Hillel (1998), a  $k_{sat}$  é determinada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, tornando-se dependente, portanto, da forma, da quantidade, da distribuição e da continuidade dos mesmos, além de variar para os diferentes tipos de solo existentes.

As operações de uso e manejo do solo modificam o sistema poroso e, paralelamente a isso, provocam modificações na  $K_{sat}$ . A magnitude das modificações estruturais causadas pelas depende da frequência das operações de práticas agrícolas superficiais e subsuperficiais no solo e, também, do efeito compactante produzido pelo trânsito do maquinário agrícola, florestal ou de animais. Além disso, a morfologia, orientação e tamanho dos sistemas radiculares dos vegetais podem afetar a  $K_{sat}$  (MESQUITA; MORAES, 2004). Nesse sentido, a condutividade hidráulica do solo saturado é mais dependente da estrutura do que da textura, além de outras propriedades físicas que influenciam diretamente na distribuição dos poros e na permeabilidade do solo, tais como a densidade, a porosidade total, a macro e a microporosidade.

A  $K_{sat}$  e a macroporosidade do solo estão intimamente correlacionadas, pois os macroporos são os principais condutores de água no solo, em condições saturadas. A macroporosidade representa o volume de poros com diâmetro maior que 50  $\mu\text{m}$  e se correlaciona positivamente com a  $K_{sat}$ . Em relação a isto, Mesquita e Moraes (2004) explicam que, de um modo geral, os maiores valores de  $K_{sat}$  são encontrados juntamente com os maiores valores de macroporosidade, porém a continuidade desses poros está mais intimamente ligada com o fluxo do que o seu tamanho. Bouma (1982) relata que pequenos poros podem conduzir mais água quando são contínuos, enquanto poros maiores e descontínuos podem não influenciar no fluxo.

Devido à importância da  $K_{sat}$ , existem diversos métodos para sua medição em campo e laboratório; porém, apresentam alta variabilidade espacial (WARRICK; NIELSEN, 1980; JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999). Mesquita e Moraes (2004) citam que essas variações ocorrem devido às diferenças inerentes de cada método, pois o permeâmetro de Guelph mede a componente horizontal e vertical de  $K_{sat}$  sob condições naturais, enquanto que o método do laboratório determina somente os valores verticais de  $K_{sat}$ , sendo incoerente comparar os dois métodos. Maheshwari

(1997) constatou que a determinação da  $K_{sat}$  em laboratório superestima os valores, devido às alterações na amostra no momento da coleta e ocorrência de fluxo preferencial durante o processo. Entretanto, a  $K_{sat}$  é usualmente determinada em laboratório por ser mais fácil, prática e rápida em relação às determinações *in situ*.

#### 4.3.3 Curva característica de água no solo e permeabilidade do solo ao ar

O conhecimento do movimento de água no solo é de grande interesse para as atividades agrícolas e florestais, por influenciar a infiltração da água no solo, o armazenamento, a drenagem, a evaporação e a absorção da mesma pelas plantas. Esse movimento controla a dinâmica dos elementos químicos que intervêm nos processos de formação e evolução dos solos, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e satisfação da demanda hídrica, os quais são dependentes das características físico-hídricas do solo, principalmente a textura, a estrutura e o teor de matéria orgânica.

Esses mecanismos são facilmente alterados pelo uso e manejo adotado no solo, e em condições de manejo inadequado, resultam em degradação da estrutura, que por sua vez alteram o tamanho e a geometria dos poros. Quando a quantidade, a dimensão e a configuração do sistema poroso são afetadas, o movimento de massa e energia sofre o mesmo efeito (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000), pois são nesses espaços onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1998). Entretanto, a matéria orgânica e/ou o sistema radicular das culturas promove a melhoria da qualidade estrutural do solo, aumentando a capacidade de retenção de água. Um estudo envolvendo a implantação de *E. grandis* foi desenvolvido por Melloni et al. (2008), que constataram que o sistema radicular e a incorporação de grande quantidade de resíduos orgânicos promoveram a formação de um sistema poroso contínuo em profundidades maiores, contribuindo para um aumento na capacidade de armazenamento, infiltração e aeração do solo, características fundamentais para promover o suprimento de ar e água ao sistema radicular das culturas.

A capacidade de retenção de água pelo solo pode não implicar em maior

quantidade de água disponível (BRADY, 1989), pois o potencial matricial é variável para diferentes solos e ao longo do perfil, tornando-se fundamental considerar o tipo de solo, a espécie vegetal e as condições de cultivo. Solos argilosos tem a capacidade de reter mais água que solos arenosos, devido a maior área superficial específica das suas partículas e pela maior proporção de poros de diâmetros menores, os quais retêm a água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas, ou seja, o potencial matricial que essa água está adsorvida às partículas do solo é maior que a capacidade das plantas em extraí-la.

A curva de retenção indica a quantidade de água retida pelo solo disponível para as plantas e caracteriza a relação existente entre o teor de água no solo e a energia que a retém (ABREU et al., 2004), os quais são decorrentes da composição granulométrica, da estrutura e da distribuição de tamanho de poros (BEUTLER; CENTURION, 2004). A quantidade de água total disponível no solo é a diferença entre a umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) (REICHARDT, 1990). A CC representa o teor máximo de água que o solo pode reter contra a força de gravidade, após o excesso ter sido drenado, sendo determinado no potencial matricial de -10 kPa para solos arenosos e -33 kPa para solos argilosos. O PMP representa a quantidade de água retida no solo em que as plantas, atingem o murchamento irreversível, sendo equivalente à umidade sob potencial de -1500 kPa.

No solo, a água e o ar competem pelo mesmo espaço, com variação somente da sua proporção, ou seja, com o aumento da umidade ocorre redução do espaço aéreo e da permeabilidade do solo ao ar e vice-versa. A permeabilidade do solo ao ar atinge seu valor máximo em solo seco e decresce progressivamente à medida que o solo vai sendo umedecido, até atingir um valor nulo quando o solo está próximo ou na condição de total saturação dos poros pela água (CHRISTENSEN, 1992). Devido a essa dependência, o volume de ar e/ou a permeabilidade de um solo devem ser sempre analisados em paralelo a valores específicos de umidade.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido em campo nativo e povoamentos florestais homogêneos de eucalipto com idades diferentes, pertencente à FEPAGRO FLORESTAS - Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisas em Florestas. O Centro pertence à Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado do RS e possui uma área de 542 hectares.

A área está localizada no Distrito de Boca do Monte, no município de Santa Maria, no Estado do Rio Grande do Sul, na Região Fisiográfica da Depressão Central, entre as Latitudes 29°30' e 29°45' Sul e as Longitudes 54° e 54°15' a Oeste de Greenwich (Figura 2). Está situada entre 90 e 135 metros de altitude. A topografia geral é suavemente ondulada, na qual as elevações são alongadas, às vezes com declives mais acentuados nas bordas e formam áreas mais baixas e planas entre as mesmas, onde localizam-se os cursos d'água (ABRÃO et al., 1988).



Figura 2 – Localização do município de Santa Maria no Estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Santa\\_Maria\\_\(Rio\\_Grande\\_do\\_Sul\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Santa_Maria_(Rio_Grande_do_Sul)) (Acesso em 09/09/2010).

## 5.2 Clima

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido. Tem como características climáticas principais, a temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio oscila entre 13 e 18° C. Estão compreendidas entre 10° e 22° C as temperaturas médias anuais. A precipitação média anual é de 1769 mm e umidade relativa do ar média é de 82 % (MORENO, 1961).

## 5.3 Vegetação

A vegetação natural predominante da área experimental é a de campo, com presença de espécies rizomatosas estoloníferas de baixo porte, com ocorrência natural da espécie *Paspalum notatum* Fluegge, e espécies dos gêneros *Axonopus*, *Andropogon*, *Panicum* e *Aristida*. Em geral, os campos apresentam elevada incidência de espécies semi-arbustivas, especialmente de vassouras (*Baccharis* spp.), maria-mole (*Sennecio* sp.), carquejas (*Baccharis* spp.) e barba-de-bode (*Aristida pallens* Cav.) (ABRÃO et al., 1988).

As matas nativas são representadas apenas por formações de galerias ao longo de um curso d'água na divisa oeste. Nestas formações vegetais, predominam espécies de baixo porte, principalmente Mirtáceas, Anacardiáceas e algumas Leguminosas. Entretanto, este tipo de vegetação encontra-se muito alterada devido à introdução de espécies florestais de alto porte, tanto nativas quanto exóticas (ABRÃO et al., 1988).

## 5.4 Solo

O estudo foi realizado em solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2006) e Typic Hapludalf, conforme Soil Taxonomy (USDA, 1999). É

pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973) e caracteriza-se por apresentar solos mediantemente profundos, com predominância de cores avermelhadas, textura superficial franco-arenosa, friáveis e bem drenados, com presença de um horizonte B textural. Quimicamente são solos ácidos e com baixo conteúdo de nutrientes e matéria orgânica (STRECK et al., 2002). Esse Argissolo não possui horizonte E e o horizonte Bt inicia a partir dos 0,80 m de profundidade (Tabela 2). A análise granulométrica do solo indicou teor médio de 630 g kg<sup>-1</sup> de areia, 170 g kg<sup>-1</sup> de silte e 200 g kg<sup>-1</sup> de argila até a profundidade de 0,80 m, enquadrando-se na classe textural franco-arenosa. O horizonte Bt tem teores médios de 500 g kg<sup>-1</sup> de areia, 160 g kg<sup>-1</sup> de silte e 340 g kg<sup>-1</sup> de argila.

Tabela 2– Caracterização granulométrica das camadas de solo nos povoamentos de *Eucalyptus grandis*, campo nativo 1, *Eucalyptus saligna* e campo nativo 2. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Área	Camada (m)	Areia total Silte Argila			Classe textural
		g kg <sup>-1</sup>			
CN1	0,00-0,20	659	155	186	Franco arenosa
	0,20-0,40	628	186	186	Franco arenosa
	0,40-0,60	625	184	191	Franco arenosa
	0,60-0,80	639	146	215	Franco argilo-arenosa
	0,80-1,00	525	187	288	Franco argilosa
EG	0,00-0,20	643	182	175	Franco arenosa
	0,20-0,40	616	199	185	Franco arenosa
	0,40-0,60	581	197	222	Franco argilo-arenosa
	0,60-0,80	570	188	242	Franco argilo-arenosa
	0,80-1,00	546	174	280	Franco argilosa
CN2	0,00-0,20	657	164	179	Franco arenosa
	0,20-0,40	628	179	193	Franco arenosa
	0,40-0,60	643	151	206	Franco argilo-arenosa
	0,60-0,80	653	138	209	Franco argilo-arenosa
	0,80-1,00	497	144	359	Franco argilosa
ES	0,00-0,20	684	164	152	Franco arenosa
	0,20-0,40	646	173	181	Franco arenosa
	0,40-0,60	606	157	237	Franco argilo-arenosa
	0,60-0,80	600	160	240	Franco argilo-arenosa
	0,80-1,00	525	158	317	Franco argilosa

Areia total: 2,00 – 0,05 mm, Silte: 0,05 – 0,002 mm, Argila: < 0,002 mm.

## 5.5 Descrição das áreas de estudo

O estudo foi conduzido em duas áreas de floresta de eucalipto e duas áreas de campo nativo adjacente ao eucalipto, adotados como testemunha (Figura 3). As avaliações foram realizadas por um período de 11 meses, de janeiro de 2010 até novembro de 2010.



Figura 3 – Disposição geográfica dos pontos de estudo na área experimental. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Fonte: Imagem do Google Earth de 28/07/2009. Acesso em 28/07/2011.

## 5.5.1 Sítio 1

5.5.1.1 Área de *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden.

O tratamento EG constitui-se de uma floresta de *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden. com idade de três anos no início das avaliações (janeiro de 2010) (Figura 4). Este povoamento foi implantado em novembro de 2006 em área coberta por vegetação de campo nativo. Antecedente ao plantio, a área recebeu roçada mecânica e preparo do solo com o auxílio de enxada rotativa somente na linha de plantio, até a profundidade de 0,20 m. As mudas de *E. grandis* foram produzidas pela Tecnoplanta Florestal LTDA, a partir de sementes de pomar clonal da Rigesa e foram plantadas num espaçamento de 3,0 x 2,0 m, onde cada parcela foi composta por 100 plantas, distribuídas em 10 linhas com 10 plantas em cada linha, totalizando uma área de 0,72 ha. As manutenções na área foram constituídas de roçadas mecânicas na entrelinha e combate a formigas até os seis primeiros meses (PREVEDELLO, 2008). A massa seca arbórea total do povoamento EG variou de 4,05 a 33,29 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo que 63,28 % constitui a biomassa do tronco integrando a madeira e a casca, 19,98 % de galhos e 16,74 % de folhas, aos dois anos de idade das árvores (WINK, 2009) (Tabela 3).

Tabela 3 – Características do povoamento de *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Variáveis	<i>Eucalyptus grandis</i> Will ex Maiden.
Número de árvores (ha <sup>-1</sup> )	1506
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	3,1
Volume c/c (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	21,2
Altura média (m)	6,3
dap médio (cm)	4,7
Massa seca arbórea total (Mg ha <sup>-1</sup> )	4,05 a 33,29
Biomassa do tronco (madeira + casca) (%)	63,28
Biomassa de galhos (%)	19,98
Biomassa de folhas (%)	16,74
Estoque médio de carbono vegetal (Mg ha <sup>-1</sup> )	8,21
Estoque médio de carbono no solo (Mg ha <sup>-1</sup> )	155,95
Estoque médio de carbono na manta edáfica (Mg ha <sup>-1</sup> )	0,55

c/c = com casca; dap = diâmetro à altura do peito. Fonte: Wink (2009).

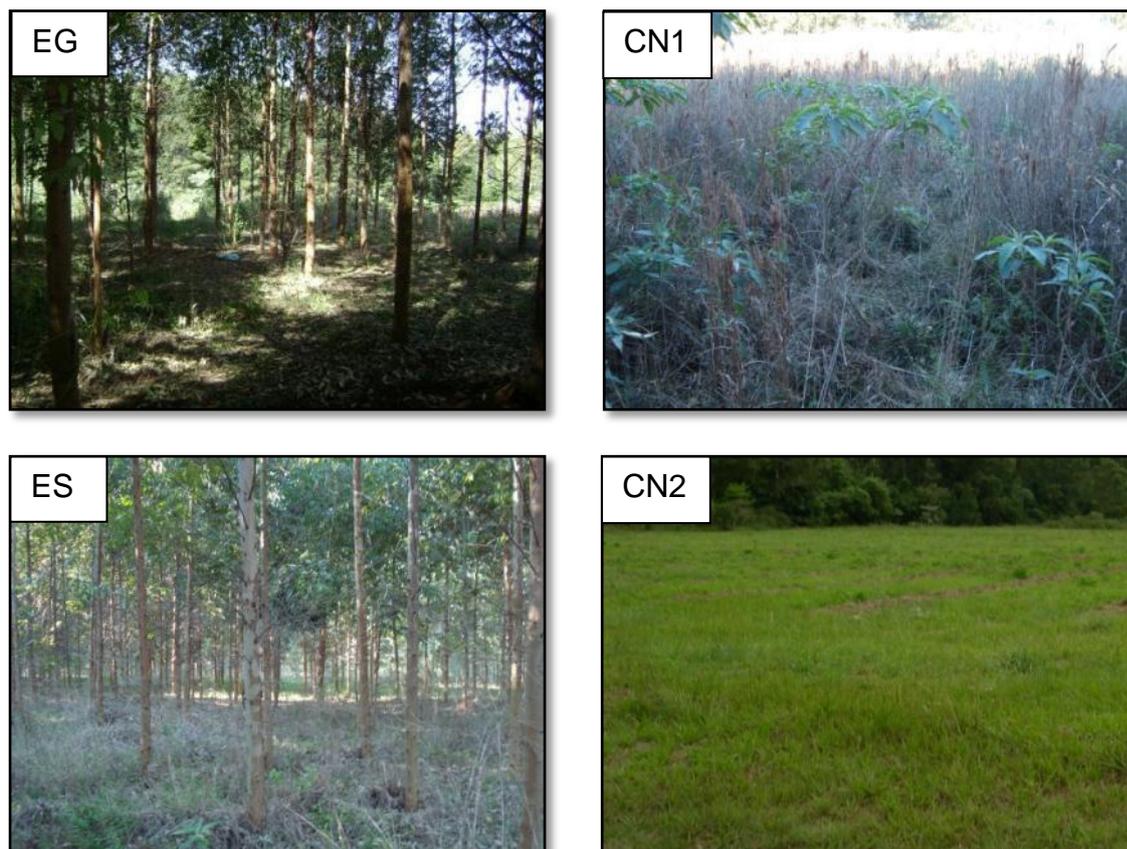


Figura 4 – Tratamentos avaliados. EG = *Eucalyptus grandis* Will ex Maiden. de 3 - 4 anos de idade; CN1 = campo nativo 1; ES = *Eucalyptus saligna* Smith de 5 - 6 anos de idade; CN2 = campo nativo 2.

#### 5.5.1.2 Área de campo nativo 1 (Testemunha 1)

O tratamento CN1 corresponde ao campo nativo 1 (Figura 4). Conforme descrição e caracterização realizada da vegetação, foram identificadas como espécies predominantes a *Solanum mauritianum* (fumo-bravo), *Paspalum notatum* Fluegge (Grama forquilha), *Andropogon lateralis* (Capim caninha), *Axonopus pressus* (Grama missioneira) e *Aristida pallens* Cav. (barba-de-bode). Essa área encontrava-se em pousio a mais de 20 anos, recebendo apenas roçada mecânica esporadicamente, aparentemente não apresentando características de degradação do solo.

A vegetação do CN1 possui um estoque médio de carbono de  $0,69 \text{ Mg ha}^{-1}$  e, no solo, esse estoque é de  $121,61 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Wink, 2009).

## 5.5.2 Sítio 2

### 5.5.2.1 Área de *Eucalyptus saligna* Smith

O tratamento ES constitui-se de um povoamento de *Eucalyptus saligna* Smith com cinco anos no início das avaliações (janeiro de 2010) (Figura 4). Este povoamento foi implantado sob vegetação de campo nativo em outubro de 2004. Antes do plantio, a área foi roçada e posteriormente foi realizado o preparo do solo somente na linha de plantio utilizando enxada rotativa até 0,15 m de profundidade. As mudas de *E. saligna* foram plantadas em um espaçamento de 3 x 1,5 m, distribuídas em 20 linhas, com 25 plantas por linha, utilizando mudas produzidas no viveiro da estação experimental da FEPAGRO FLORESTAS, totalizando uma área de 0,225 ha. Na área, foram realizadas roçadas na entrelinha de plantio e combate a formigas nos primeiros seis meses. Os dados de caracterização das árvores que compõem o tratamento ES estão apresentados na tabela 4. Wink (2009) encontrou, para este experimento, valores de massa seca arbórea total de 12,03 a 119,69 Mg ha<sup>-1</sup>, destes, 8,06 % constitui o compartimento folhas, 9,80% de galhos e 82,14 % de madeira e casca, aos 4 anos de idade das árvores de eucalipto.

Tabela 4 – Características do povoamento de *Eucalyptus saligna* Smith. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Variáveis	<i>Eucalyptus saligna</i> Smith
Número de árvores (ha <sup>-1</sup> )	1609
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	16,9
Volume c/c (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	129,4
Altura média (m)	13,2
dap médio (cm)	10,8
Massa seca arbórea total (Mg ha <sup>-1</sup> )	12,03 a 119,69
Biomassa do tronco (madeira + casca) (%)	82,14
Biomassa de galhos (%)	9,8
Biomassa de folhas (%)	8,06
Estoque médio de carbono vegetal (Mg ha <sup>-1</sup> )	27,68
Estoque médio de carbono no solo (Mg ha <sup>-1</sup> )	142,93
Estoque médio de carbono na manta edáfica (Mg ha <sup>-1</sup> )	0,99

c/c = com casca; dap = diâmetro à altura do peito. Fonte: Wink (2009).

### 5.5.2.2 Área de campo nativo 2 (Testemunha 2)

O tratamento CN2 corresponde ao campo nativo 2 (Figura 4). Conforme a descrição e a caracterização da vegetação foram identificadas como espécies predominantes a *Paspalum notatum* Fluegge (Grama forquilha), *Andropogon lateralis* (Capim caninha), *Axonopus pressus* (Grama missioneira) e *Aristida pallens* Cav. (Barba-de-bode). Assim como o CN1, essa área encontrava-se em pousio há mais de 20 anos, recebendo frequentes roçadas mecânicas.

A vegetação do CN2 possui um estoque médio de carbono de  $0,69 \text{ Mg ha}^{-1}$  e, no solo, esse estoque é de  $121,61 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Wink, 2009).

## 5.6 Coleta das amostras de solo

A coleta das amostras foi realizada através da abertura de trincheiras nas entrelinhas dos plantios de eucalipto (EG e ES) e, ainda, em suas respectivas testemunhas (áreas de campo nativo). Foram abertas três trincheiras em cada área de estudo, totalizando 12 pontos de coleta. Os pontos de coleta localizaram-se próximos para reduzir a influência da variabilidade do terreno, buscando selecionar perfis homogêneos (Tabela 2).

Para a análise das propriedades físico-hídricas como a densidade, a porosidade total, a microporosidade e a macroporosidade, a condutividade hidráulica saturada, a condutividade ao ar e a curva característica de água no solo, foram coletadas, em abril de 2010, amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura, no centro das camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m de profundidade, com três repetições para cada tratamento. Nessas mesmas camadas, foram coletadas amostras com estrutura alterada para realizar a caracterização granulométrica do solo e a estimativa da retenção de água nos potenciais matriciais de -500 e -1500 kPa com um psicrômetro.

## 5.7 Propriedades físicas do solo

### 5.7.1 Densidade do solo, porosidade e curva de retenção de água

Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria – RS. No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se cuidadosamente o excesso de solo das faces superior e inferior dos cilindros metálicos. A fim de evitar perdas de solo durante o processo de saturação e manuseio das amostras, a parte inferior da amostra foi vedada com tecido permeável à água. Posteriormente, as amostras foram saturadas por ascensão capilar por 48 horas, cuja lâmina de água foi elevada gradativamente até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Após a completa saturação, as amostras foram submetidas às tensões de -6 e -10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) para determinar respectivamente a macro e microporosidade e a umidade na capacidade de campo. Em seguida foram submetidas às tensões de -33 e -100 kPa em Câmara de Richards (KLUTE, 1986).

O conteúdo de água retido na amostra no potencial de -10 kPa foi considerado como a umidade na capacidade de campo para este solo. A umidade nos potenciais de -500 kPa e -1500 kPa foi determinada no psicrômetro, com o uso de amostras com estrutura não preservada. A umidade obtida para correlacionar com a medida do potencial da água no solo lido pelo psicrômetro é a gravimétrica; portanto, multiplicaram-se os valores de umidade gravimétrica pela densidade do solo correspondente para cada camada amostrada, obtendo-se, assim, a umidade volumétrica.

A curva de retenção foi obtida pela relação entre a umidade e o potencial matricial de água no solo em cada ponto avaliado, sendo os dados ajustados ao modelo de Van Genuchten (1980). A umidade do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) foi utilizada para calcular a quantidade total de água disponível armazenada no solo, sendo determinada pela diferença de umidade entre o potencial matricial de -10 kPa (CC) e o potencial matricial de -1500 kPa (PMP).

### 5.7.2 Análise granulométrica do solo

A composição granulométrica foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). Esse método baseia-se na dispersão da amostra com solução de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>, separação da fração areia por tamisamento em úmido e da argila pela velocidade de sedimentação, considerando-se a lei de Stokes. O silte é determinado pela diferença das massas de areia e argila do total. A classificação textural foi realizada segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2006).

### 5.7.3 Umidade e armazenamento de água no solo

A umidade volumétrica do solo foi monitorada no período de 11 meses, de janeiro de 2010 a novembro de 2010, nos diferentes tratamentos. A umidade volumétrica foi avaliada nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80; 0,80 a 1,00; 1,00 a 1,20; 1,20 a 1,40; 1,40 a 1,60 m utilizando-se dois TDR 100 (Campbell Cientific) (Figura 5). Entretanto, neste trabalho foi analisada somente a umidade volumétrica do solo até a profundidade de 0,80 m. Na programação do sistema para aquisição automática dos dados, foi inserida uma equação de calibração específica para o solo em estudo, a fim de obter uma melhor precisão nos dados obtidos (KAISER, 2010).

Para cada tratamento avaliado, foram selecionados três pontos aleatórios para a instalação das sondas com duas hastes metálicas, utilizadas para monitorar a umidade do solo (Figura 6). Em todas as profundidades, as sondas foram inseridas verticalmente, ou seja, num ângulo de 90°, permitindo assim, que uma camada de 0,20 m fosse avaliada nas leituras, totalizando oito sondas por ponto. As sondas foram confeccionadas com dimensões de 0,21 m de comprimento e 0,045 m de distancia entre as hastes. Para a instalação das mesmas em cada profundidade monitorada, abriu-se um canal com cerca de 10 cm de diâmetro, com o auxílio de um trado de caneca. Após a instalação das sondas, o canal foi fechado, tomando-se

o cuidado para compactar o solo neste canal, a fim de evitar a ocorrência de fluxo preferencial da água.

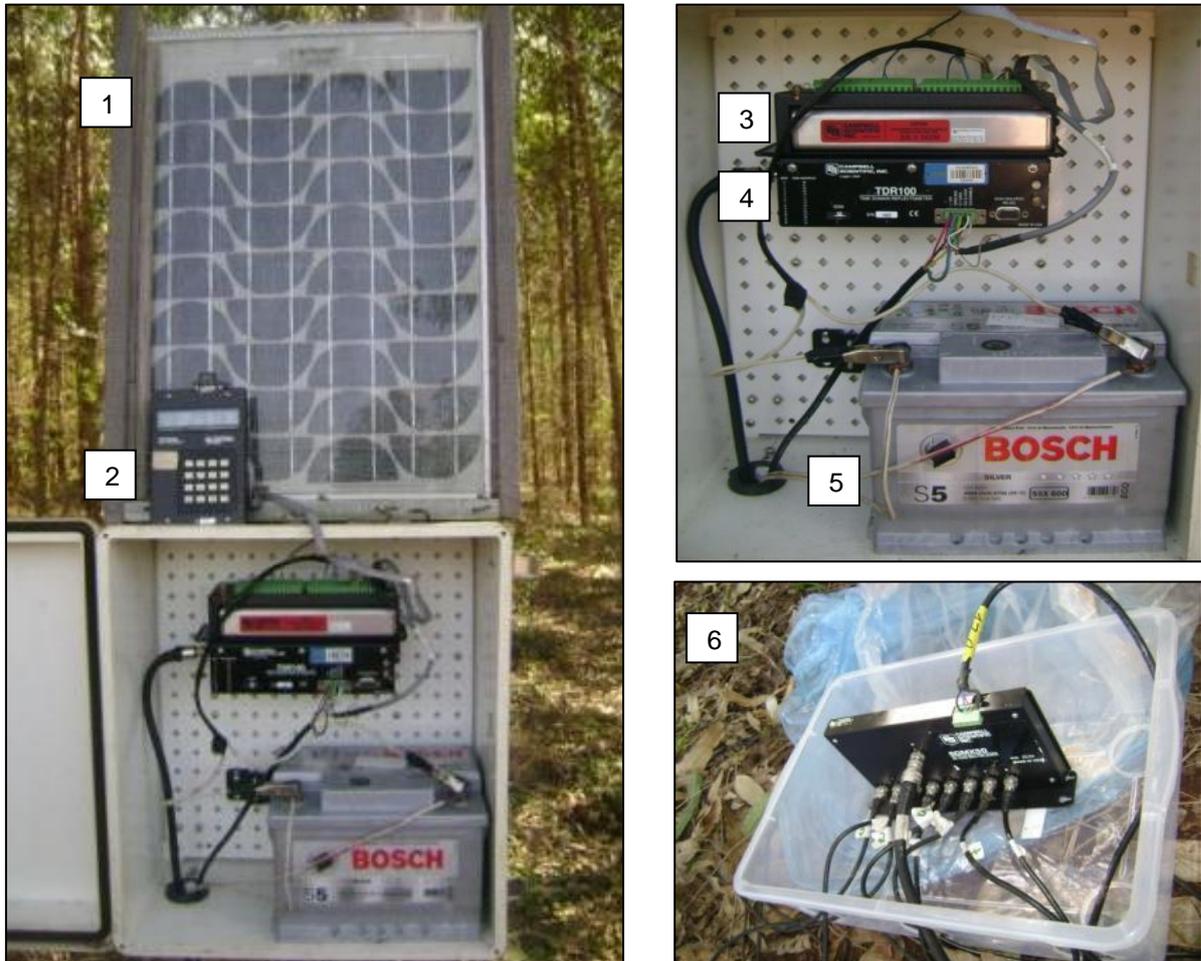


Figura 5 – Sistema automático de monitoramento da umidade do solo. 1: Placa solar; 2: teclado programador; 3: Datalogger; 4: TDR-100; 5: Bateria; 6: Multiplexador e as 8 sondas conectadas.

As sondas foram conectadas em multiplexadores e armazenadores de dados, sendo todo o sistema automatizado e alimentado por duas baterias de 12 volts, as quais eram constantemente recarregadas por uma placa solar. A automatização permitiu fazer leituras a cada 30 minutos. Além disso, monitoraram-se a precipitação pluviométrica durante o período de avaliação, com o auxílio de um pluviômetro automático conectado ao Datalogger.

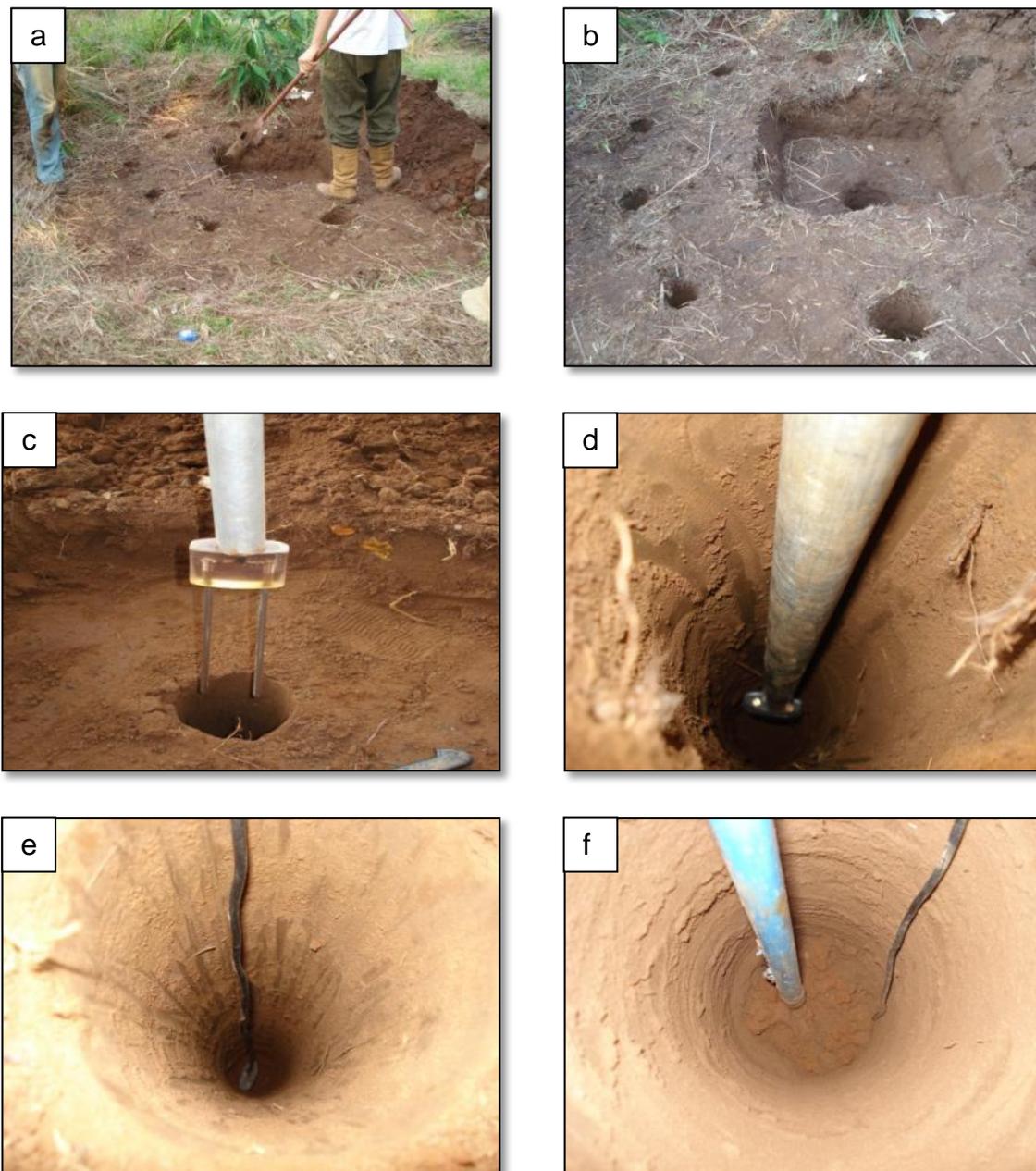


Figura 6 – Canais abertos para instalação das sondas (a e b); Sonda sendo introduzida no canal com ajuda de um cano de alumínio (c e d); sonda já instalada verticalmente dentro do canal (e); Fechamento do canal com compactação do solo para evitar ocorrência de fluxo preferencial da água da chuva (f).

A quantidade de água disponível (AD) foi calculada pela diferença entre o teor de água obtido na capacidade de campo (-10 kPa) e o teor de água retido no potencial de -1500 kPa, considerado como o ponto de murcha permanente. A quantidade total de água armazenada no solo (QTA) foi avaliada no limite superior

de água disponível para as plantas, incluindo todas as camadas avaliadas no estudo.

#### 5.7.4 Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade do solo ao ar

As amostras coletadas em anéis concêntricos foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais de -1, -6 e -10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e -33 e -100 kPa em Câmara de Richards, para calcular a distribuição do tamanho de poros pela equação fundamental da capilaridade e calcular o espaço aéreo pela diferença entre a porosidade total de cada amostra e o conteúdo volumétrico de água em cada potencial.

Após o equilíbrio em cada tensão, mediu-se o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeômetro de carga constante de ar (Figura 7). Esse equipamento é composto por uma série de fluxímetros com diferentes vazões, por onde o ar flui antes de passar pelo solo. O ar é aplicado a baixa pressão (0,1 kPa) e constante, para evitar o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra é medido por um manômetro de água.

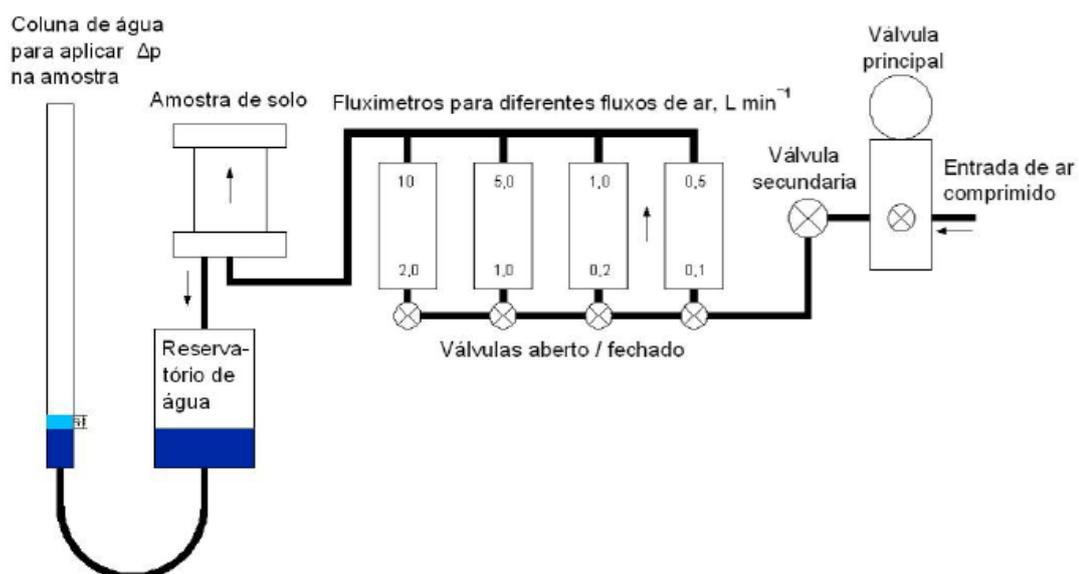


Figura 7 – Permeômetro para a medição do fluxo de ar em amostras indeformadas de solo.

Fonte: Vossbrink (2005) e modificado por Brandt (2009).

A condutividade do ar no solo ( $K_l$ ) foi calculada segundo a equação 1:

$$K_l = \rho_l \cdot g \frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \quad [1]$$

em que:  $K_l$  é a condutividade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ );  $\rho_l$  é a densidade do ar no momento da medida ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ );  $\Delta V$  é a quantidade de ar que passa na amostra no  $\Delta t$  ( $\text{cm}^3$ );  $l$  é a altura da amostra (cm);  $\Delta t$  é a variação de tempo (s);  $\Delta p$  é a pressão do ar que passa pela amostra (1 cm de coluna de água =  $1000 \text{ dinas cm}^{-2}$ ;  $\text{dinas} = \text{g cm s}^{-2}$ ); e  $A$  é a área do cilindro ( $\text{cm}^2$ );

A densidade do ar foi calculada pela equação 2:

$$\rho_l = \rho_n \left( \frac{T_n p}{p_n T} \right) \quad [2]$$

em que:  $\rho_l$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\rho_n$  é a densidade padrão do ar ( $1,293 \text{ kg m}^{-3}$ );  $T_n$  é a temperatura padrão ( $273,15 \text{ °K}$ );  $p$  é a pressão atmosférica durante a medida (mbar);  $p_n$  é a pressão atmosférica padrão (1013 mbar); e  $T$  é a temperatura do ar durante a medida ( $^{\circ}\text{K}$ ).

A partir da condutividade ao ar, calculou-se a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ), pela equação 3:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l \cdot g} \quad [3]$$

em que:  $K_a$  é a permeabilidade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ );  $K_l$  é a condutividade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ );  $\eta$  é a viscosidade do ar ( $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ );  $\rho_l$  é a densidade do ar no momento da medida ( $\text{g cm}^{-3}$ ); e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ ).

O espaço aéreo ou porosidade de aeração ( $\varepsilon_a$ ) foi estimado para as camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m pela diferença entre a porosidade total ( $P_t$ ) e o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_v$ ) (equação 4) para cada potencial matricial específico:

$$\varepsilon_a = P_t - \theta_v \quad [4]$$

### 5.7.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

Após equilibradas à tensão de -100 kPa na Câmara de Richards, as amostras foram novamente saturadas para medir o fluxo de água e calcular a condutividade hidráulica do solo saturado. O fluxo de água foi medido em permeômetro de carga variável (Figura 8), conforme procedimento descrito por Gubiani et al. (2010).

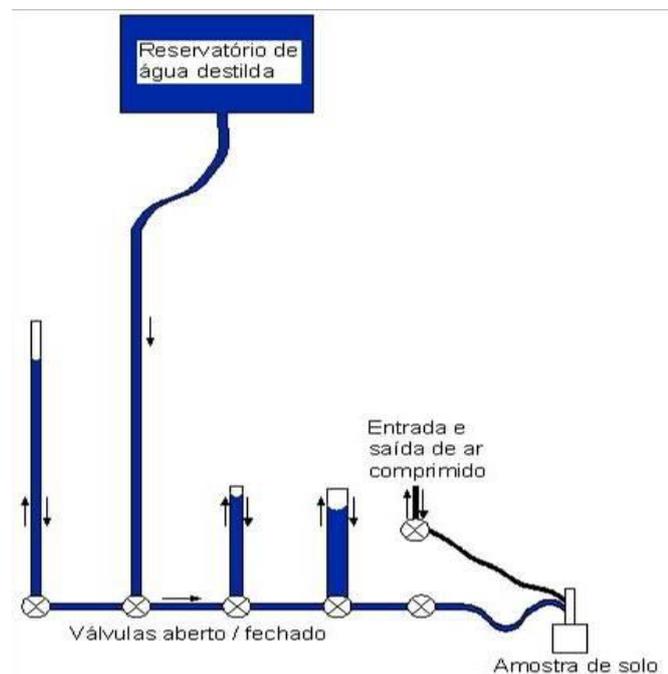


Figura 8 – Permeômetro de carga variável utilizado para a medida do fluxo de água nas amostras indeformadas de solo.

Fonte: Brandt (2009).

A condutividade hidráulica do solo saturado foi calculada com a equação 5:

$$k_{\theta} = \frac{aL}{A(\Delta t)} \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad [5]$$

em que:  $K_{\theta}$  é a condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm s}^{-1}$ );  $a$  é a área da seção transversal do tubo capilar onde se mede  $H$  ( $\text{cm}^2$ );  $L$  é a comprimento da amostra de solo ( $\text{cm}$ );  $A$  é a área da seção transversal da amostra de solo ( $\text{cm}^2$ );  $H_1$  é a altura da

carga hidráulica no início da leitura (cm);  $H_2$  é a altura da carga hidráulica no final da leitura (cm); e  $\Delta t$  é a tempo decorrido entre  $H_1$  e  $H_2$ .

## 5.8 Precipitação pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos na Estação Meteorológica Principal de Santa Maria (ECPSM), pertencente ao 8.º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia, (latitude: 29°42'S; longitude: 53°43'W; altitude: 95m).

## 5.9 Análise estatística

Os dados obtidos nas avaliações foram inicialmente submetidos à análise de distribuição normal, com o uso do teste de Shapiro-Wilk. Verificou-se que todas as variáveis apresentaram distribuição normal.

Em função da área experimental formar dois sítios diferentes, a área de *Eucalyptus grandis* (EG) foi comparada com a sua testemunha, o campo nativo 1 (CN1), compondo, dessa forma, o sítio 1. Do mesmo modo, os dados da área de *Eucalyptus saligna* (ES) foram comparados com a sua respectiva testemunha, o campo nativo 2 (CN2), que formou, assim, o sítio 2. Para analisar as áreas do sítio 1 e do sítio 2, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste “t” de Student a 5% de probabilidade de erro.

Para verificar a existência de inter-relações entre as propriedades físicas avaliadas, foram realizadas análise de regressão e análise de correlação de Pearson, empregando-se o coeficiente de correlação com nível de significância de 5%. Todas as análises foram realizadas com o pacote estatístico SAS (SAS, 2002).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Densidade do solo e distribuição do tamanho de poros

A densidade do solo é um atributo que reflete o arranjo das partículas do solo e, portanto, está intimamente associada às características do sistema poroso (FERREIRA, 2010) e qualquer manifestação na disposição das partículas do solo reflete-se diretamente na densidade. A distribuição dos poros e a densidade são características estruturais facilmente alteradas pelo uso e manejo (REICHERT et al., 2009a; KAISER, 2010). Dessa forma, para avaliar o nível de compactação do solo, Reichert et al. (2007) propôs uma equação utilizando dados estimados para culturas agrícolas, a qual relaciona a densidade quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero com o teor de argila. A partir dessa metodologia e analisando o solo do presente estudo, obteve-se uma densidade crítica de  $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$ , considerando o teor médio de argila de  $222 \text{ g kg}^{-1}$ .

A densidade do solo diferiu significativamente somente entre o povoamento de *Eucalyptus grandis* (EG) e a área de campo nativo 1 (CN1), nas camadas de 0,10 a 0,20 e 0,40 a 0,50 m (Tabela 5). Com exceção da camada superficial do solo, a densidade no tratamento EG foi numericamente superior em todas as camadas de solo avaliadas, em comparação ao CN1. Comparando povoamentos florestais de referência (*Pinus pinaster* e *Quercus suber*) com *E. globulus*, Madeira (1989) observou que o solo sob eucalipto resultou em aumento da densidade e, conseqüentemente, redução da porosidade total, afetando principalmente os macroporos. Guariz et al. (2009) estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo verificaram que o solo sob eucalipto resultou em maior densidade em comparação com um solo sob fragmento florestal, de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Em estudo avaliando diferentes usos em Argissolo Vermelho, Suzuki (2008) encontrou densidade de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$  para vegetação de floresta e  $1,32$  e  $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$  para áreas sob eucalipto com, respectivamente, 20 anos e com 4,5 anos de idade conduzido na segunda rotação. Ambas as áreas resultaram em densidade abaixo de  $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$ , considerado como crítico para esse solo.

Tabela 5 – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (Pt) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) para as áreas e camadas de solo avaliadas. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Área	Ds	Mac	Mic	Pt	Ksat
	-----Mg m <sup>-3</sup> -----	-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----	-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----	-----	---mm h <sup>-1</sup> ---
Camada de 0,00 - 0,10 m					
CN1	1,35a	0,20a	0,29a	0,48a	211a
EG	1,33a	0,22a	0,23a	0,45a	207a
c.v.	6	22	17	5	45
CN2	1,41a	0,11a	0,33a	0,44a	78b
ES	1,42a	0,15a	0,29a	0,44a	193a
c.v.	9	41	7	10	89
Camada de 0,10 - 0,20 m					
CN1	1,50b	0,14a	0,27a	0,41a	52a
EG	1,56a	0,13a	0,28a	0,41a	79a
c.v.	3	7	3	2	42
CN2	1,57a	0,10a	0,29a	0,39a	63a
ES	1,55a	0,11a	0,26a	0,37a	56a
c.v.	2	13	9	5	60
Camada de 0,20 - 0,30 m					
CN1	1,48a	0,13a	0,28a	0,41a	86a
EG	1,58a	0,10a	0,27a	0,37a	34b
c.v.	4	20	3	7	48
CN2	1,55a	0,09b	0,29a	0,38a	16b
ES	1,66a	0,12a	0,25a	0,37a	47a
c.v.	9	25	9	8	78
Camada de 0,30 - 0,40 m					
CN1	1,57a	0,10a	0,27a	0,37a	118a
EG	1,59a	0,08a	0,27a	0,35a	38b
c.v.	3	20	5	4	88
CN2	1,57a	0,09a	0,27a	0,36a	35b
ES	1,52a	0,12a	0,26a	0,38a	90a
c.v.	3	24	4	6	84
Camada de 0,40 - 0,50 m					
CN1	1,54b	0,11a	0,28a	0,39a	128a
EG	1,62a	0,07b	0,27a	0,34b	26b
c.v.	3	21	6	7	101
CN2	1,59a	0,08b	0,27a	0,35a	21b
ES	1,53a	0,10a	0,24b	0,34a	67a
c.v.	3	27	10	8	121

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. c.v. = coeficiente de variação. Médias seguidas por mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de t em 5% de probabilidade de erro.

Não se verificou diferença significativa da densidade do solo ao comparar as áreas de *Eucalyptus saligna* (ES) e campo nativo 2 (CN2). Nesse sítio, a densidade do CN2 nas camadas mais superficiais do solo foi menor do que no ES, porém, a partir da camada de 0,30 a 0,40 m, a densidade aumenta e torna-se superior ao encontrado para o eucalipto. As gramíneas que compõem o CN2 são benéficas devido à alta densidade de raízes nas camadas mais superficiais do solo, estimulando a atividade biológica em função da liberação de exsudatos (SILVA; MIELNICZUK, 1997), favorecendo a formação de um sistema poroso mais estável, condição que é determinante para a redução da densidade e o consequente aumento nas taxas de infiltração e percolação da água no solo. O ES tem densidade do solo superior à densidade crítica na camada de 0,20 a 0,30 m, com valor de  $1,66 \text{ Mg m}^{-3}$ . Gonçalves et al. (2002) e Reichert et al. (2007) descrevem que em áreas florestais a compactação do solo pode atingir profundidades maiores, devido ao não revolvimento das camadas mais profundas no momento da implantação. Rigatto et al. (2005) descreve que alta densidade nessa camada pode dificultar a penetração de raízes e, conseqüentemente, restringir o desenvolvimento das plantas.

Em estudo avaliando diferentes usos do solo implantados em Argissolo, Suzuki (2008) encontrou densidade superior a  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$  para um povoamento de eucalipto com 4,5 anos conduzido na segunda rotação, e descreve que o valor pode estar relacionado à compactação causada no momento do preparo do solo, denominado de pé-de-arado. Essas conseqüências também foram visualizadas e relatadas em áreas agrícolas e florestais por diversos autores (STONE; SILVEIRA, 1999; ALVES; SUZUKI, 2004; PREVEDELLO, 2008). Gent et al. (1984) consideram que densidade superior a  $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$  são limitantes para o crescimento de espécies florestais em solos de textura argilosa na camada superficial, ressaltando-se que em subsuperfície o crescimento das raízes cessa em valores próximos a  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Em ambos os sítios, a densidade foi menor na superfície (0,00 a 0,10 m) aumentando com a profundidade em todos os tratamentos (Tabela 5). Esse comportamento está relacionado ao fornecimento contínuo de material orgânico pela serapilheira ou restos culturais na camada superficial do solo em diferentes estágios de decomposição, além da atividade dos microrganismos associados à ação do sistema radicular de plantas, as quais suprem o solo de resíduos e exsudações de substâncias orgânicas, produzindo agregação estável por envolver fisicamente os microagregados do solo (OADES, 1978), atuando de forma significativa para a

melhoria da estrutura do solo (BRAIDA et al., 2011). Além disso, com o aumento da profundidade no perfil do solo ocorre adensamento natural proporcionado pelas camadas subjacentes (CAVENAGE et al., 1999; SUZUKI, 2008, PREVEDELLO, 2008). Verifica-se, enfim, que a elevação da densidade do solo ocorre conjuntamente com a redução da macroporosidade e a redução da porosidade total.

A densidade nas diferentes áreas e camadas avaliadas variaram de 1,33 a 1,65 Mg m<sup>-3</sup> e, independentemente da densidade crítica para esse solo ser de 1,63 Mg m<sup>-3</sup>, estão dentro da faixa considerada não restritiva ao crescimento radicular de culturas agrícolas, que vai de 1,20 a 1,80 Mg m<sup>-3</sup>, para solos de textura arenosa (BRADY, 1989). Reinert et al. (2008) também propôs o valor de 1,75 Mg m<sup>-3</sup> como crítico para culturas agrícolas para essa classe textural.

A partir dos dados da tabela 5, não se observa diferença significativa de macroporosidade do solo entre as áreas do EG e CN1, entretanto, a maior macroporosidade é verificada na camada superficial, com valores de 0,22 e 0,20 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Em povoamentos florestais o aporte de matéria orgânica, devido à grande quantidade de serapilheira que se acumula na superfície, favorece a ação de organismos do solo e, conseqüentemente, resulta em maior agregação e estruturação das partículas do solo, com a formação de macroporos sendo favorecida. Nas demais camadas, verifica-se que a área de CN1 apresenta maior macroporosidade quando comparado com a área sob EG. Os dados obtidos estão de acordo com Rosa (2010), que encontrou macroporosidade de 0,20 e 0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na camada superficial após um ano da substituição da vegetação de campo nativo pelo plantio de *Eucalyptus dunii*, respectivamente, em um Argissolo em São Francisco de Assis.

Em contrapartida, comparando-se as áreas de ES e CN2, verifica-se diferença significativa de macroporosidade nas camadas de 0,20 a 0,30 e 0,40 a 0,50 m, com valor superior para o povoamento de eucalipto. Nas demais camadas, as áreas são semelhantes, porém, a menor quantidade de macroporos foi verificada no CN2.

Apesar dos valores de densidade do solo não ultrapassarem os limites críticos, a macroporosidade encontrou-se bastante reduzida, com valores próximos a 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> nas camadas subsuperficiais, considerado por muitos autores como a porosidade de aeração limitante, pois a difusão de oxigênio no solo será reduzida, dificultando as trocas gasosas do solo com a atmosfera, além do bom

desenvolvimento das culturas (XU et al., 1992; TORMENA et al., 1998; KLEIN; LIBARDI, 2002).

A maior microporosidade e maior porosidade total foram verificadas nas áreas sob campo nativo em comparação com as áreas de eucalipto, entretanto, não é constatado diferença significativa entre os tratamentos de ambos os sítios. Cavenage et al. (1999) constataram que o solo sob mata ciliar (reflorestada com espécies nativas) e *Pinus* sp. provocaram alteração nessas propriedades físicas em relação à vegetação natural de cerrado. Melloni et al. (2008) ao compararem a qualidade do solo em diferentes coberturas florestais e pastagem no Sul de Minas Gerais verificaram que, a microporosidade não diferiu entre os ecossistemas estudados, enquanto a macroporosidade foi maior na mata ( $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) seguido pelos demais ecossistemas, encontrando valores de  $0,20$ ;  $0,16$  e  $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para o eucalipto, a araucária e a pastagem, respectivamente. Quando o solo é cultivado inadequadamente, a pressão exercida na superfície do solo rearranja as partículas sólidas, aproximando-as, aumentando a densidade e reduzindo o espaço poroso (CAVENAGE et al., 1999). Esse impacto na estrutura do solo altera o volume e a distribuição do tamanho dos poros, o que dificulta a capacidade de enraizamento em função da redução da difusão de gases no solo (KLEIN; LIBARDI, 2002).

## **6.2 Condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar**

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) expressa a habilidade do meio em conduzir água, por isso é fortemente influenciada pelo grau de compactação (KLUTE; DIRKSEN, 1986). Assim, as condições do sistema poroso, como a quantidade, tamanho e sua continuidade irão influenciar diretamente a  $K_{sat}$  e, conseqüentemente, o movimento de água no solo. Conforme a tabela 5, a  $K_{sat}$  nos tratamentos EG e CN1 apresentaram diferença significativa nas camadas mais profundas do solo, com maior  $K_{sat}$  no CN1 a partir da camada de  $0,20$  a  $0,30 \text{ m}$ , justificado pela sua menor densidade e maior macroporosidade, corroborando com Camargo e Alleoni (1997), os quais constataram que a menor densidade resulta em maior  $K_{sat}$  nos solos. A análise de correlação confirmou essa afirmação, uma vez que a densidade teve correlação negativa com a condutividade hidráulica, enquanto

a macroporosidade e a porosidade total correlacionaram-se positivamente (Tabela 6).

No sítio 2, com exceção da camada de 0,20 a 0,30 m, verifica-se diferença significativa de Ksat entre o ES e o CN2, sendo que o ES apresentou maior Ksat, o que está relacionado à maior macroporosidade. Carvalho (2002) descreve que a classe de solo e suas características morfoestruturais, como o grau de estruturação e a qualidade e estabilidade dos agregados, são os principais responsáveis pelas diferenças nos parâmetros físicos, tais como a densidade, a distribuição do tamanho de poros, a retenção de água e a condutividade hidráulica. Entretanto, em determinados tipos de solo e após anos sob sistemas de uso e manejo, não se observam diferenças significativas dos parâmetros citados e, Espírito Santo (1998) justifica que as alterações no solo continuam a ocorrer dentro de cada sistema de cultivo, porém o tempo e a intensidade para que tais diferenças se manifestem é variável com a classe de solo. Em solos de textura arenosa, por apresentarem baixa resiliência, se degradam e se recuperam mais facilmente do que solos argilosos, ou seja, esses solos tem menor capacidade de resistir às forças de degradação, porém, quando manejados adequadamente, se recuperam mais rapidamente que solos argilosos (REINERT, 1998).

Tabela 6 – Correlação de Pearson entre a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) com a densidade (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (Pt) e classes de diâmetro de poros (Dp). FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

	<b>Ds</b>	<b>Mac</b>	<b>Mic</b>	<b>Pt</b>	<b>Ksat</b>
<b>Dp &gt; 300 µm</b>	-0,35****	0,63****	-0,27***	0,39****	0,33***
<b>Dp 300 - 50 µm</b>	-0,53****	0,88****	-0,37****	0,57****	0,56****
<b>Dp 50 - 30 µm</b>	-0,19*	0,34***	-0,16 <sup>ns</sup>	0,20*	0,58****
<b>Dp 30 - 9 µm</b>	0,34****	-0,24**	0,08 <sup>ns</sup>	-0,17*	-0,06 <sup>ns</sup>
<b>Dp 9 - 3 µm</b>	0,02 <sup>ns</sup>	-0,02**	-0,05 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>
<b>Dp &lt; 3 µm</b>	-0,08 <sup>ns</sup>	-0,37****	0,96****	0,42****	-0,19*
<b>Ds</b>	1	-0,59****	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,61****	-0,52****
<b>Mac</b>	-	1	-0,40****	0,66****	0,62****
<b>Mic</b>	-	-	1	0,42****	-0,12 <sup>ns</sup>
<b>Pt</b>	-	-	-	1	0,51****

\*\*\*\*Significativo a 0,0001; \*\*\* significativo a 0,001; \*\* significativo a 0,01; \* significativo a 0,05; ns = não significativo.

Nesse estudo, a maior condutividade hidráulica de solo saturado foi encontrada na camada superficial em todos os tratamentos e, Kaiser (2010) relata que isso pode indicar presença de poros maiores e contínuos nessa camada, pois o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos (REICHERT et al., 2007). As demais camadas apresentaram tendência de redução acentuada da  $K_{sat}$  com a profundidade, porém o CN1 resultou nos maiores valores de  $K_{sat}$  em comparação com o EG.

Entre as áreas ES e CN2, percebe-se maior  $K_{sat}$  no ES, o que pode ser explicado pela distribuição do tamanho dos poros ocorrentes nas diferentes áreas, com quantidade superior de poros de diâmetro maior no ES em relação ao CN2 (Figura 9). Um solo ideal deve apresentar volume e dimensão de poros adequados para a entrada, movimento e retenção de água e ar, além de atender às necessidades das culturas (HILLEL, 1998). Em condições saturadas, os poros de maior diâmetro são responsáveis pela aeração e condução de água, enquanto que os poros menores atuam na retenção e condução de água em condições não saturadas. Portanto, a redução da proporção de macroporos pode restringir o fluxo de água saturado (RIBEIRO et al., 2007) e comprometer a entrada e redistribuição de água no perfil (KAISER, 2010) e a aeração do solo.

A análise estatística da distribuição do tamanho dos poros foi realizada comparando as áreas EG e CN1 e as áreas ES e CN2, apresentadas na figura 9. A distribuição dos poros nas diferentes classes de tamanho não diferiram entre os tratamentos nas camadas avaliadas. Entretanto, as áreas que compõem o sítio 1 (EG e CN1) apresentaram a maior quantidade de macroporos, representados pelas classes de diâmetro maior que 300  $\mu\text{m}$  e de 300 a 50  $\mu\text{m}$ , principalmente nas camadas mais superficiais do solo, quando comparado com as áreas ES e CN2, sendo que o EG apresentou maior quantidade desses poros. De acordo com Ribeiro et al. (2007), para entender minuciosamente o comportamento do solo, a distribuição dos poros por seu tamanho é mais importante que somente conhecer a porosidade total, pois o movimento e o armazenamento de água e gases, fluxo e retenção de calor e desenvolvimento do sistema radicular são facilmente alterados e influenciados pelas classes de poros que ocorrem no solo e, dessa forma, indicam a possibilidade de haver restrição ou não de fluxo de água.

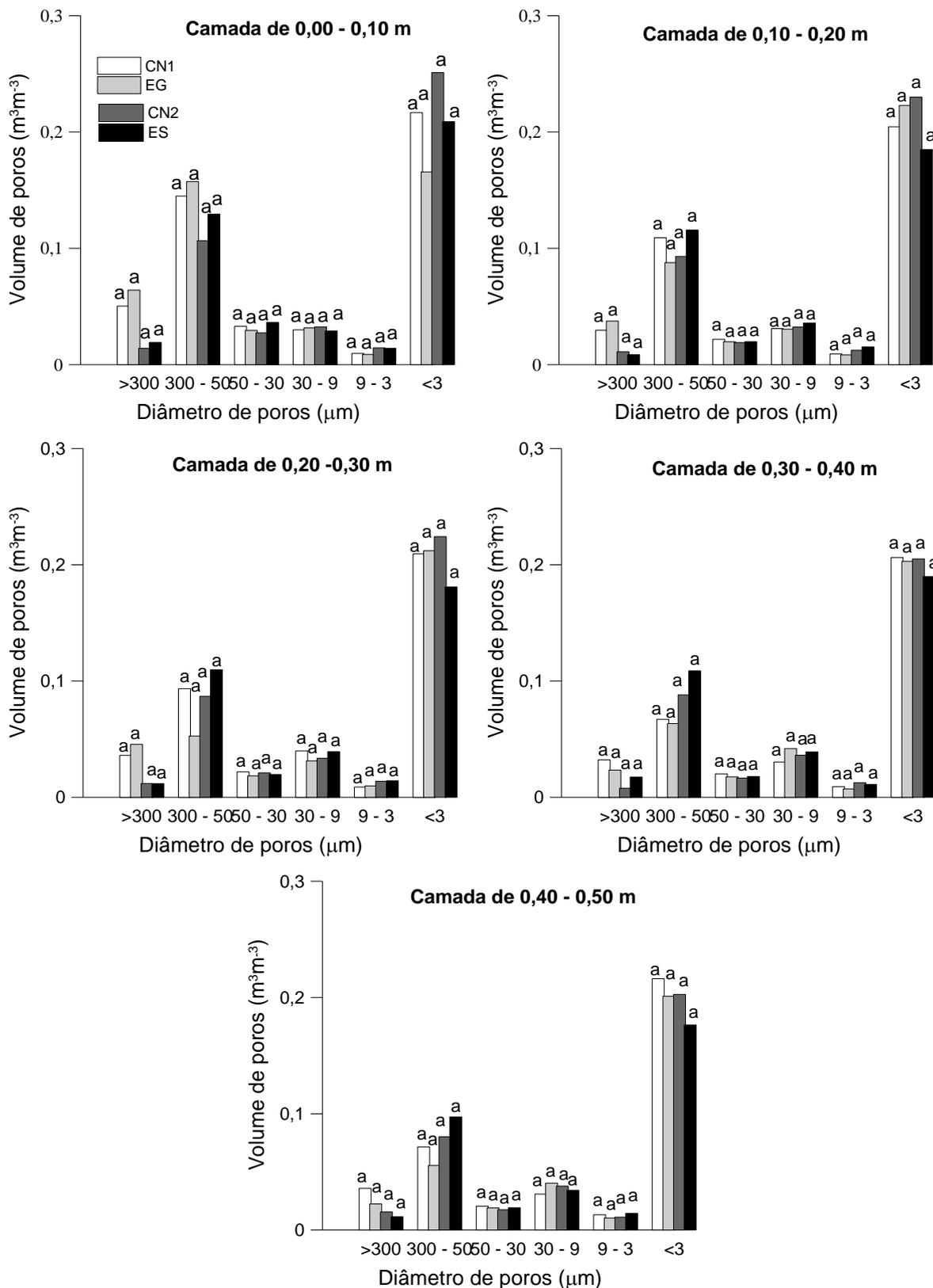


Figura 9 – Distribuição do diâmetro de poros nos diferentes usos e camadas do solo avaliadas.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*.

A partir disso é possível afirmar que, os poros com diâmetro maior que 50  $\mu\text{m}$ , que representam os macroporos e que perdem água em potenciais menores que -6 kPa tem maior relação com a  $K_{\text{sat}}$ , corroborando com Ribeiro et al. (2007). A macroporosidade é fator de extrema importância na condutividade hidráulica saturada, pois são provenientes do mesmo espaço poroso (MESQUITA; MORAES, 2004) e, nesse, predominam as forças de gravidade em relação às forças de capilaridade, relativas ao movimento de água no solo (BEVEN; GERMANN; 1982). A tabela 6 confirma essas afirmações, uma vez que a  $K_{\text{sat}}$  apresentou correção positiva com a macroporosidade do solo ( $R^2 = 0,62$ ), corroborando com Silva e Kato (1997) que encontraram valores elevados de macroporosidade correlacionados positivamente com a condutividade hidráulica saturada.

Com relação aos microporos, poros de diâmetro menor que 50  $\mu\text{m}$  e que perdem água em potenciais entre -6 e -1500 kPa, as áreas ES e CN2 apresentaram a maior quantidade desses poros em praticamente todas as camadas, onde o CN2 foi o de maior representatividade, porém, sem apresentar diferença estatística com o ES (Figura 9). Os poros de diâmetro menor que 3  $\mu\text{m}$  são aqueles chamados de criptoporos (KLEIN; LIBARDI, 2002), esses poros retêm água em elevadas tensões, a qual fica indisponível às plantas, pois a água estará retida em um potencial matricial abaixo do ponto de murcha permanente. Diante disso, as áreas do sítio 2 (ES e CN2) tendem a apresentar os maiores problemas com relação à disponibilidade de água para as plantas, devido à maior quantidade de poros nessa classe.

A densidade do solo correlacionou-se negativamente com as classes de poros de diâmetro maior que 30  $\mu\text{m}$  e positivamente com as classes menores, isso demonstra que um aumento na densidade promove uma alteração na estrutura porosa, reduzindo os poros maiores e aumentando os menores, com reflexos diretos na condutividade hidráulica e, essa, por conseguinte, apresentou correlação significativa com os poros maiores que 30  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, é possível inferir que, uma elevação na densidade e uma redução da porosidade total, com redução principalmente dos poros maiores (maiores que 30  $\mu\text{m}$ ), acaba reduzindo a  $K_{\text{sat}}$ , que nesse estudo apresentou correlação significativa com as classes de poros de maior diâmetro.

Considerando o valor de macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  citado na literatura por diversos autores (XU et al., 1992; TORMENA et al., 1998) como o limitante para

permitir uma adequada aeração do solo e conseqüente desenvolvimento satisfatório das plantas, é possível estimar a condutividade hidráulica saturada crítica utilizando a equação 6 (Figura 10):

$$\log k_{sat} = 7,69 \times Mac + 0,64 \quad [6]$$

em que:  $\log k_{sat}$  é o logaritmo da condutividade hidráulica saturada e  $Mac$  é a macroporosidade.

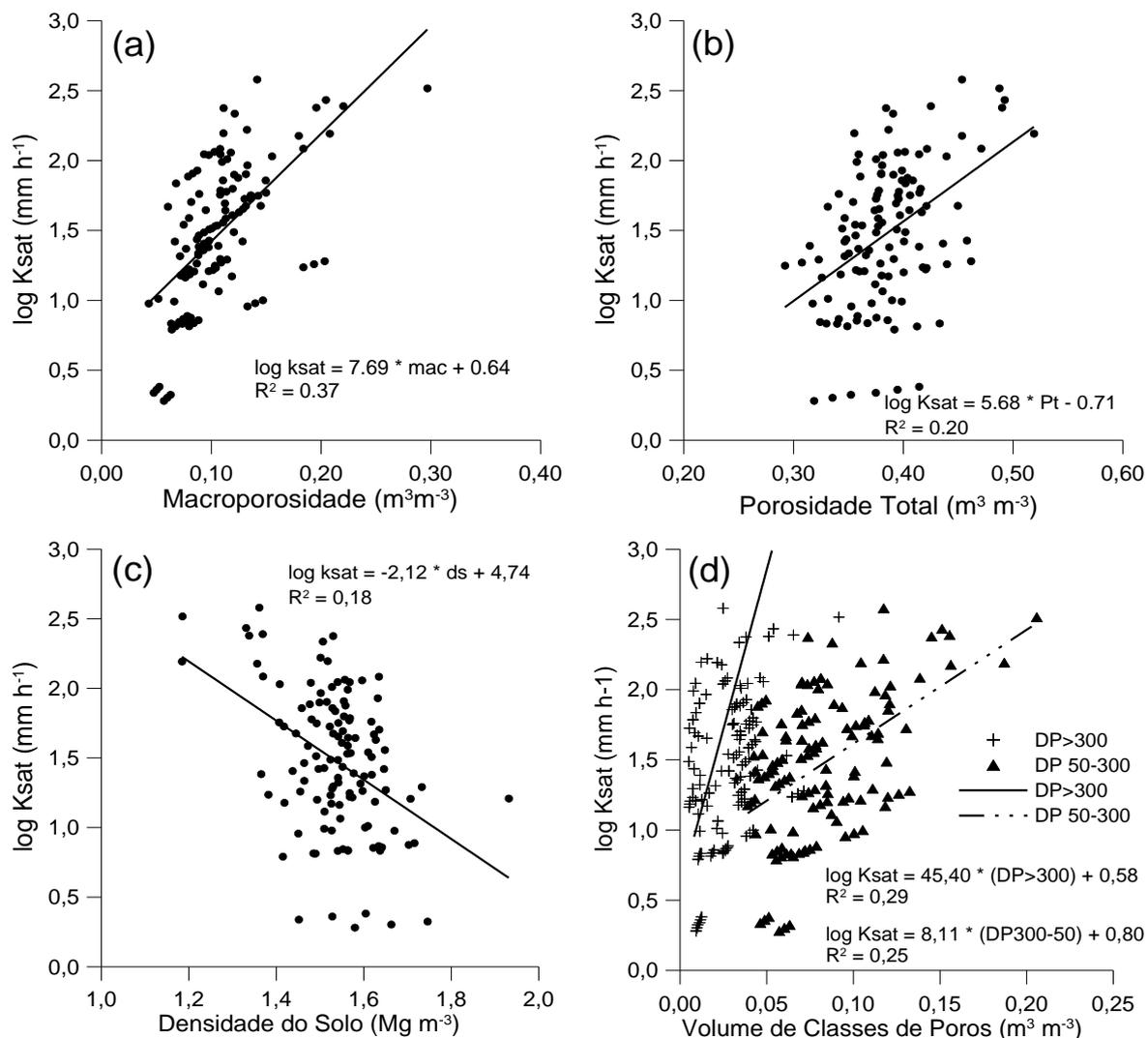


Figura 10 - Regressões lineares entre a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) com a macroporosidade (a), porosidade total do solo (b), com a densidade do solo (c) e diâmetro de poros maiores que 300  $\mu$ m e diâmetro de poros de 50 – 300  $\mu$ m (d).

No presente estudo, o valor de condutividade hidráulica do solo saturado mínimo correspondente a esse limite de macroporosidade foi de  $25,6 \text{ mm h}^{-1}$ , assim, a porosidade total do solo mínima deveria ser de  $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e a densidade máxima que o solo poderia atingir sem apresentar problemas de aeração seria  $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$ . O valor mínimo atribuído à  $K_{\text{sat}}$  está associado ao valor mínimo de aeração, que neste caso foi superior ao encontrado em Argissolo submetido a diferentes manejos por Reichert et al. (2007) e Kaiser (2010), de  $13,8$  e  $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente.

O maior valor de  $K_{\text{sat}}$  encontrado para o solo em estudo pode estar relacionado à ausência de atividade de manejo nas áreas, tanto no campo nativo quanto nas florestas de eucalipto, além disso, o aporte de material orgânico e a grande quantidade de raízes presente nas áreas promovem a aproximação das partículas, através da constante absorção de água no perfil do solo, às periódicas renovações do sistema radicular e a uniforme distribuição dos exsudatos no solo, as quais vão estimular a atividade microbológica (SILVA; MIELNICZUK, 1997) e, conseqüentemente, favorecem a estabilização de agregados e a estruturação e formação de um sistema poroso contínuo (BOUMA, 1982).

A relação entre a  $K_{\text{sat}}$  e a distribuição de poros com diâmetro maior que  $50 \mu\text{m}$ , correspondentes à macroporosidade, está apresentada na figura 10d. Pode-se verificar que, um pequeno aumento no volume dessas classes de poros, principalmente dos poros maiores que  $300 \mu\text{m}$ , provocam aumento na  $K_{\text{sat}}$ , sendo confirmada também pela correlação existente entre essas variáveis (Tabela 6). A partir disso, pode-se inferir que, a substituição do campo nativo pelo cultivo do eucalipto não altera a qualidade estrutural do solo, pois auxilia na formação de poros contínuos favoráveis para uma adequada aeração e condução de água.

A permeabilidade é uma propriedade do solo que depende da porosidade e do teor de água no solo, no entanto, os poros devem ser contínuos para permitir as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Os usos do solo não apresentaram diferença estatística de permeabilidade ao ar ( $K_{\text{ar}}$ ) nos potenciais em que as amostras foram equilibradas (Tabela 7), isso pode ter ocorrido em função do alto valor dos coeficientes de variação, entre 10 a 80 %. A grande variabilidade dos dados de  $K_{\text{ar}}$  é, provavelmente, reflexo da grande diversidade no tamanho, proporção, forma e continuidade dos poros do solo, resultado semelhante foi encontrado por Kaiser (2010) e Abrão (2010).

Tabela 7 - Permeabilidade do solo ao ar ( $\mu\text{m}^2$ ) de amostras equilibradas em diferentes potenciais ( $\Psi$ ) nos diferentes usos e camadas do solo avaliadas. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Área	$\Psi$ - 6	$\Psi$ -10	$\Psi$ -33	$\Psi$ -100
----- kPa-----				
Camada de 0,00 – 0,10 m				
CN1	2,62a	3,27a	4,27a	2,91a
EG	2,56a	3,14a	4,04a	4,06a
c.v.	37	47	57	44
CN2	1,75a	1,97a	2,40a	2,64a
ES	3,26a	3,29a	3,68a	4,16a
c.v.	76	78	80	74
Camada de 0,10 – 0,20 m				
CN1	1,57a	1,56a	1,71a	1,90a
EG	2,38a	2,06a	1,96a	1,92a
c.v.	10	21	38	23
CN2	1,68a	1,53a	1,55a	1,77a
ES	1,43a	1,48a	1,68a	1,72a
c.v.	31	31	32	19
Camada de 0,20 – 0,30 m				
CN1	2,47a	2,69a	3,20a	3,20a
EG	2,14a	1,94a	1,94a	1,89a
c.v.	30	36	42	29
CN2	1,50a	1,54a	1,73a	1,59a
ES	2,54a	2,39a	2,50a	2,83a
c.v.	31	19	35	30
Camada de 0,30 – 0,40 m				
CN1	2,78a	2,18a	1,80a	1,77a
EG	1,83a	1,67a	1,69a	1,79a
c.v.	32	27	21	24
CN2	1,76a	1,63a	1,67a	1,67a
ES	1,79a	1,99a	2,41a	2,20a
c.v.	34	30	34	37
Camada de 0,40 – 0,50 m				
CN1	1,84a	1,83a	2,02a	1,79a
EG	2,56a	2,07a	1,79a	2,62a
c.v.	16	29	46	57
CN2	1,36a	1,26a	1,42a	1,29a
ES	1,44a	1,51a	1,73a	1,74a
c.v.	24	26	31	28

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t a 5% de probabilidade de erro. c.v.: coeficiente de variação (%). CN1: campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*.

De maneira geral, a Kar foi maior nas camadas superficiais (0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m), reduzindo em todos os usos com o aumento da profundidade do

solo. Essa tendência está relacionada com a estrutura do solo, pois as camadas superficiais apresentaram menor densidade e maior macroporosidade e porosidade total (Tabela 5). Beven e Germann (1982) comentam que o fluxo de gases é controlado pela quantidade de poros maiores e contínuos, dessa forma, por apresentar melhor distribuição dos macroporos, a camada superficial favorece a transmissão de gases entre os espaços porosos do solo, resultando em maiores valores absolutos de Kar.

Com a drenagem da água devido à aplicação sucessiva de potenciais maiores, observou-se aumento dos valores de Kar, ocorrendo maior variação no intervalo entre os potenciais de -10 e -33 kPa em todos os usos do solo estudados (Tabela 7). Isso se deve à drenagem da água contida principalmente nos macroporos, que passam a ser um importante canal responsável pela drenagem e aeração, os quais são esvaziados nos potenciais menores, quando a maioria dos microporos encontra-se ainda preenchida por água (BRADY, 1989; KAISER, 2010). Esse comportamento pode ser confirmado pela correlação significativa entre os poros de grande diâmetro (> 50  $\mu\text{m}$ ) e a Kar e Ksat (Tabela 8). A Kar nos potenciais matriciais -33 e -100 kPa apresentou correlação significativa com a Ksat e com os poros de grandes diâmetros (> 50  $\mu\text{m}$ ), assim, com o aumento dos potenciais aplicados ao solo, os poros de maior diâmetro vão sendo esvaziados e, conseqüentemente, a Ksat e a Kar aumentam.

Tabela 8 – Correlação de Pearson entre a permeabilidade ao ar (Kar) em diferentes potenciais e as diferentes classes de diâmetros de poros do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

	Classes de diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ )						
	Ksat	> 300	300 a 50	50 a 30	30 a 9	9 a 3	< 3
<b>Kar<math>_{\psi}</math> -6 kPa</b>	ns	0,48****	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Kar<math>_{\psi}</math> -10 kPa</b>	ns	0,47****	0,20*	ns	ns	ns	ns
<b>Kar<math>_{\psi}</math> -33 kPa</b>	0,18*	0,45****	0,23*	ns	ns	ns	ns
<b>Kar<math>_{\psi}</math> -100 kPa</b>	0,34****	0,33***	0,24**	0,19*	-0,23**	ns	ns
<b>Ksat</b>	1	0,33***	0,56****	0,58****	ns	ns	0,19*

\*\*\*\*Significativo a 0,0001; \*\*\* significativo a 0,001; \*\* significativo a 0,01; \* significativo a 0,05; ns = não significativo.

Aumentando o potencial de -33 para -100 kPa, é esperado que ocorra redução do teor de água com consequente favorecimento da passagem de ar, entretanto, essa tendência não é verificada em todos os tratamentos e camadas de solo avaliadas e, Corcini (2008) descreve que esse fato pode ser decorrente de entupimentos de poros durante o processo de análise.

A Kar possui relação inversa com o conteúdo de água e com a condutividade hidráulica do solo saturado (BALL; SCHJØNNING, 2002), onde o valor máximo de permeabilidade é atingido na condição de solo seco, diminuindo progressivamente com o umedecimento do solo e, pode ser nulo em condição de saturação e, nesta, a  $K_{sat}$  será máxima. Um valor de Kar de 1  $\mu\text{m}$  foi sugerido como limite crítico por McQueen e Shepherd (2002) e Ball e Schjønning (2002), abaixo do qual as condições físicas do solo poderiam ser limitantes para o crescimento das plantas. Com base nisso, observa-se que o solo de ambos os sítios não possuem valores de Kar limitante, o que indica que a substituição do campo nativo pelo eucalipto mantém os macroporos eficientes para conduzir ar, melhorando a aeração do solo nas diferentes camadas.

A variação da permeabilidade do solo ao ar em função do espaço aéreo ( $E_a$ ) para sucessivos e decrescentes potenciais de água no solo está apresentada na figura 11. Os diferentes usos do solo apresentaram correlação positiva entre a Kar e o  $E_a$ , em todas as profundidades, fato verificado também por Fontanela (2008) e Sequinatto (2010). Os maiores valores de  $E_a$  e Kar ocorreram na camada superficial (0,00 a 0,10 m), os quais reduziram com o aumento da profundidade.

A aeração do solo é um processo dinâmico (SILVA et al., 2009) e dependente da estrutura e do conteúdo de água no solo. A camada superficial não apresentou restrição de aeração, enquanto que as demais camadas exibiram alguns valores abaixo de 0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . O maior  $E_a$  está relacionado à maior Kar em todas as profundidades, sendo que essa tendência variou em função do uso dado ao solo, assim, o CN1 e EG apresentaram os maiores valores até a profundidade de 0,20 m. O  $E_a$  e a Kar avaliados neste estudo refletiram as características alteradas na estrutura do solo impostas pelo uso. Pode-se observar ainda na figura 11, a intrínseca relação da variação do espaço aéreo com a permeabilidade ao ar, onde claramente verifica-se a tendência de aumento do espaço aéreo à medida que se aplica sucessivos potenciais decrescentes, com consequente aumento gradativo da permeabilidade ao ar, em todas as camadas e em todos os usos do solo.

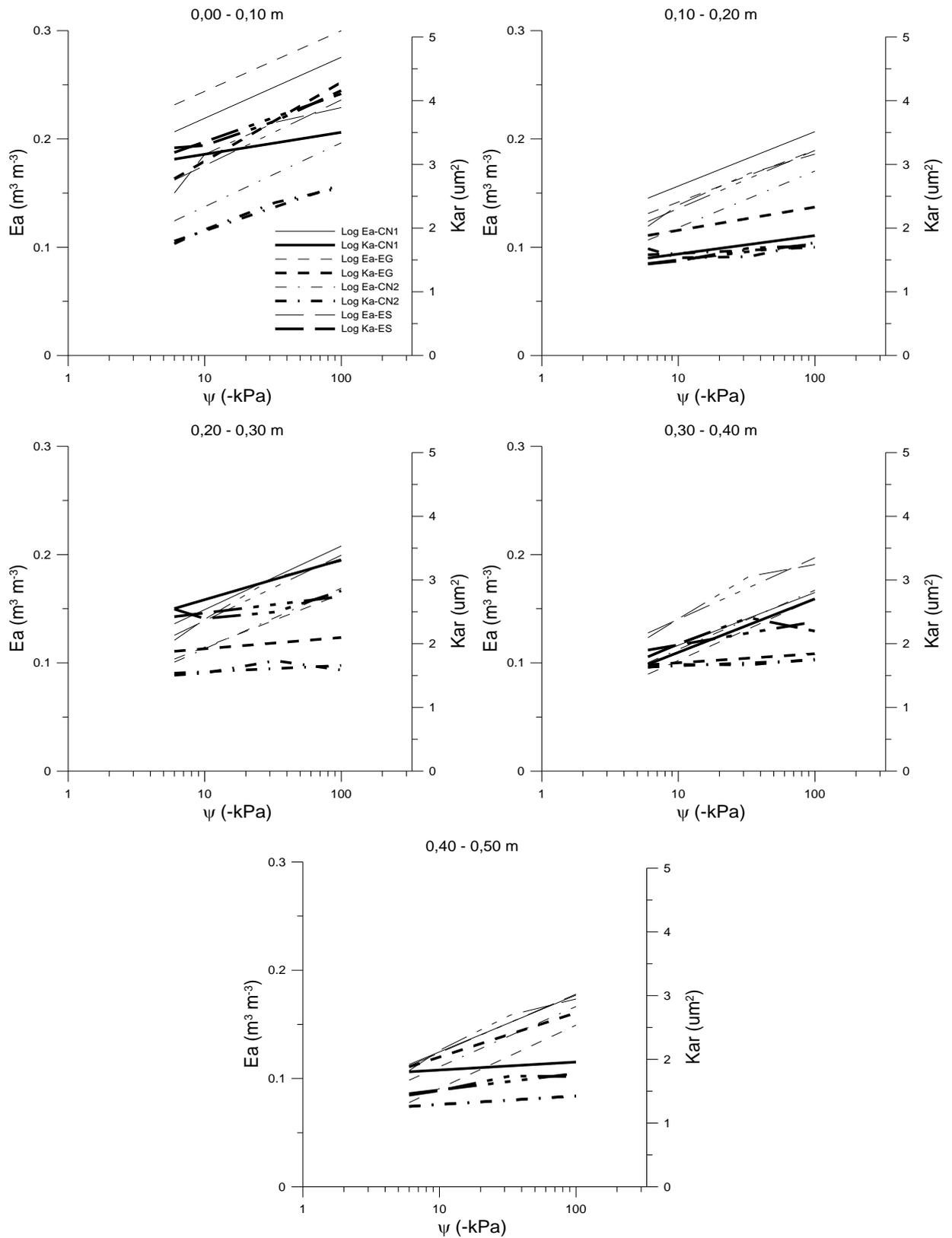


Figura 11 – Relação entre a permeabilidade ao ar (Kar) e o espaço aéreo (Ea) do solo para os diferentes usos do solo e camadas avaliadas.

### 6.3 Curva de retenção de água no solo

Muitos são os fatores que afetam a retenção de água no solo, sendo a granulometria e a estrutura os principais (REICHARDT, 1990). A granulometria determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água e as proporções de poros de diferentes tamanhos. A estrutura define o arranjo das partículas e, conseqüentemente, a distribuição do tamanho dos poros do solo. Assim, a curva de retenção permite conhecer a variação do potencial de água no solo na faixa de água disponível para as plantas. O efeito do CN1 e EG na curva de retenção de água no solo pode ser visualizado na figura 12. Nos dois tratamentos que compõem o sítio 1, a maior umidade no ponto de saturação é verificado na camada superficial no solo (0,00 a 0,10 m). Isso ocorre devido à influência dos resíduos orgânicos nessa camada, as quais proporcionam melhoria da estrutura, ou seja, menor densidade e aumento da macroporosidade e da porosidade total do solo.

Praticamente toda a água é retida nos potenciais maiores (baixas tensões) com ocorrência de queda brusca da umidade, principalmente a partir da capacidade de campo (-10 kPa), característico de solos arenosos devido à predominância da macroporosidade (REICHARDT, 1990). Hillel (1998) justifica que, na faixa de baixas tensões a retenção de água depende principalmente do efeito da capilaridade e da distribuição de tamanho de poros sendo, portanto, afetada pela estrutura do solo. Em altas tensões, o fenômeno da adsorção é responsável pela retenção de água, influenciada pela granulometria e pela superfície específica do solo. Vieira (1986) comenta que solos bem estruturados tem porosidade maior, retendo mais água, enquanto solos compactados tem sua macroporosidade reduzida, causando redução na umidade de saturação e menor retenção inicial de água.

A retenção de água não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, porém, o tratamento CN1 resultou em maior retenção quando comparado com o EG, em todas as camadas de solo avaliadas (Figura 12). A maior quantidade de poros existentes no CN1 justifica a maior retenção de água. Todas as alterações que ocorrem nas propriedades físicas do solo são fatores que interferem diretamente na capacidade de retenção de água. Dessa forma, quanto melhor estruturado for o solo, maior a quantidade de água retida, dando uma indicação da disponibilidade de água às plantas (CORCINI, 2008).

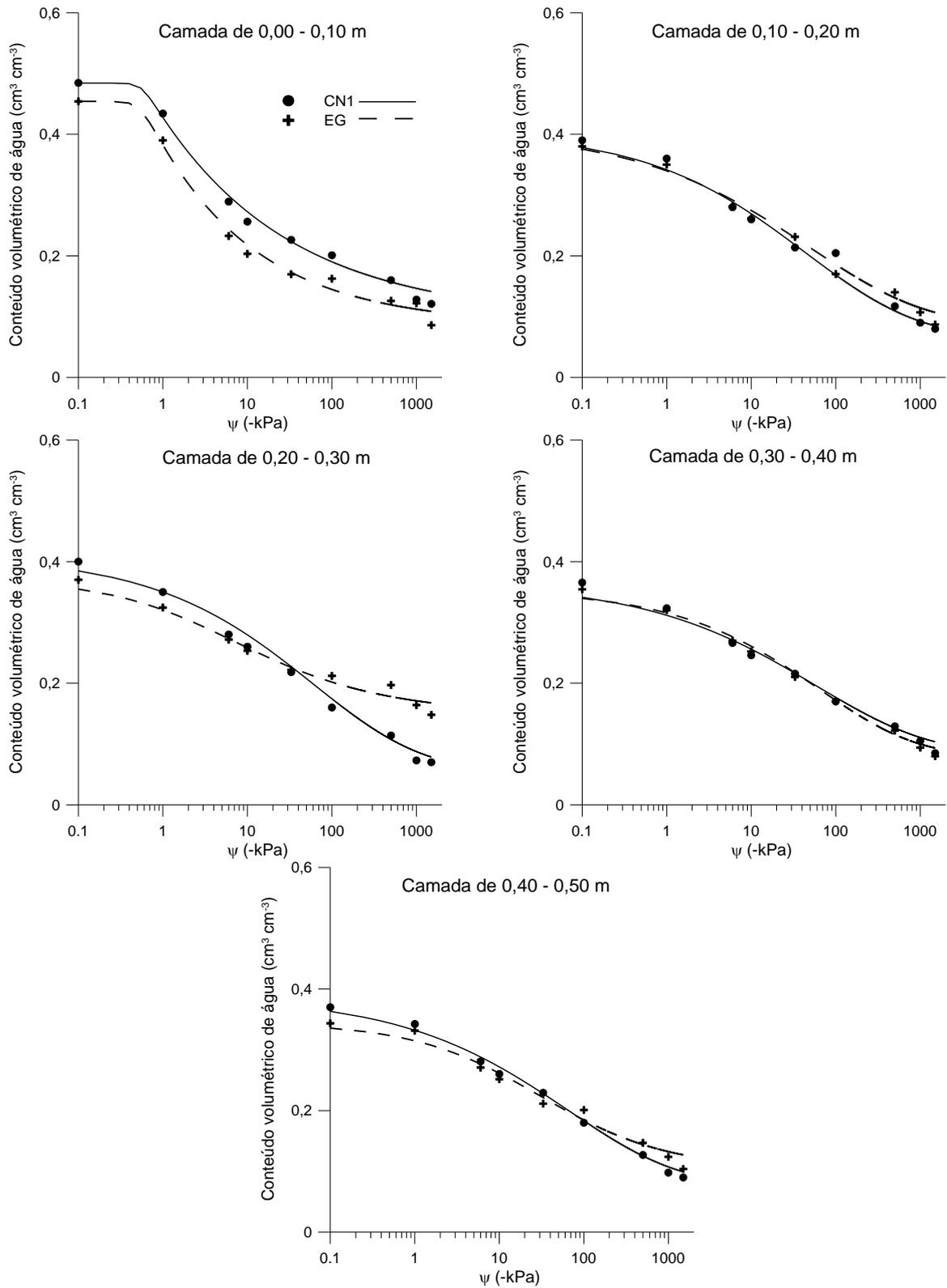


Figura 12 - Curvas de retenção de água no solo do sítio 1.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

As curvas de retenção de água no solo dos tratamentos CN2 e ES, nas camadas avaliadas, estão apresentadas na figura 13. Não ocorre diferença significativa de retenção de água entre os dois tratamentos do sítio 2, entretanto, o CN2 retém maior quantidade de água no solo quando comparado com o ES, tendência que pode ser decorrente da maior microporosidade. A partir do potencial de -100 kPa verifica-se um aumento na retenção de água no tratamento ES, nas camadas de 0,00 a 0,10, 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m. Isso indica que ocorreu uma alteração na distribuição e continuidade dos poros, pois a quantidade de poros foi semelhante entre as duas áreas.

O conteúdo de água na capacidade de campo ( $\Psi$  - 10 kPa) obtido na curva de retenção de água não variou significativamente entre EG e CN1, em todas as camadas avaliadas (Tabela 9). Comparando as áreas do sítio 2, ES e CN2, verifica-se diferença significativa somente na camada superficial (0,00 a 0,10 m), com menor conteúdo de água no ES, tendência verificada também nas camadas de 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,30 m. O menor conteúdo de água disponível no tratamento ES pode ser decorrente da menor quantidade de microporos.

A variação na capacidade de campo foi de 0,20 a 0,30  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$  para as diferentes áreas e camadas, o que está de acordo com o valor de 0,27  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$  encontrado para solos de textura franco arenosa por Carlesso (1998). Para o conteúdo de umidade no ponto de murcha permanente ( $\Psi$  - 1500 kPa), esse mesmo autor encontrou um valor de 0,11  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , corroborando com os valores obtidos neste estudo, os quais variaram de 0,06 a 0,10  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$  entre as camadas e diferentes usos do solo.

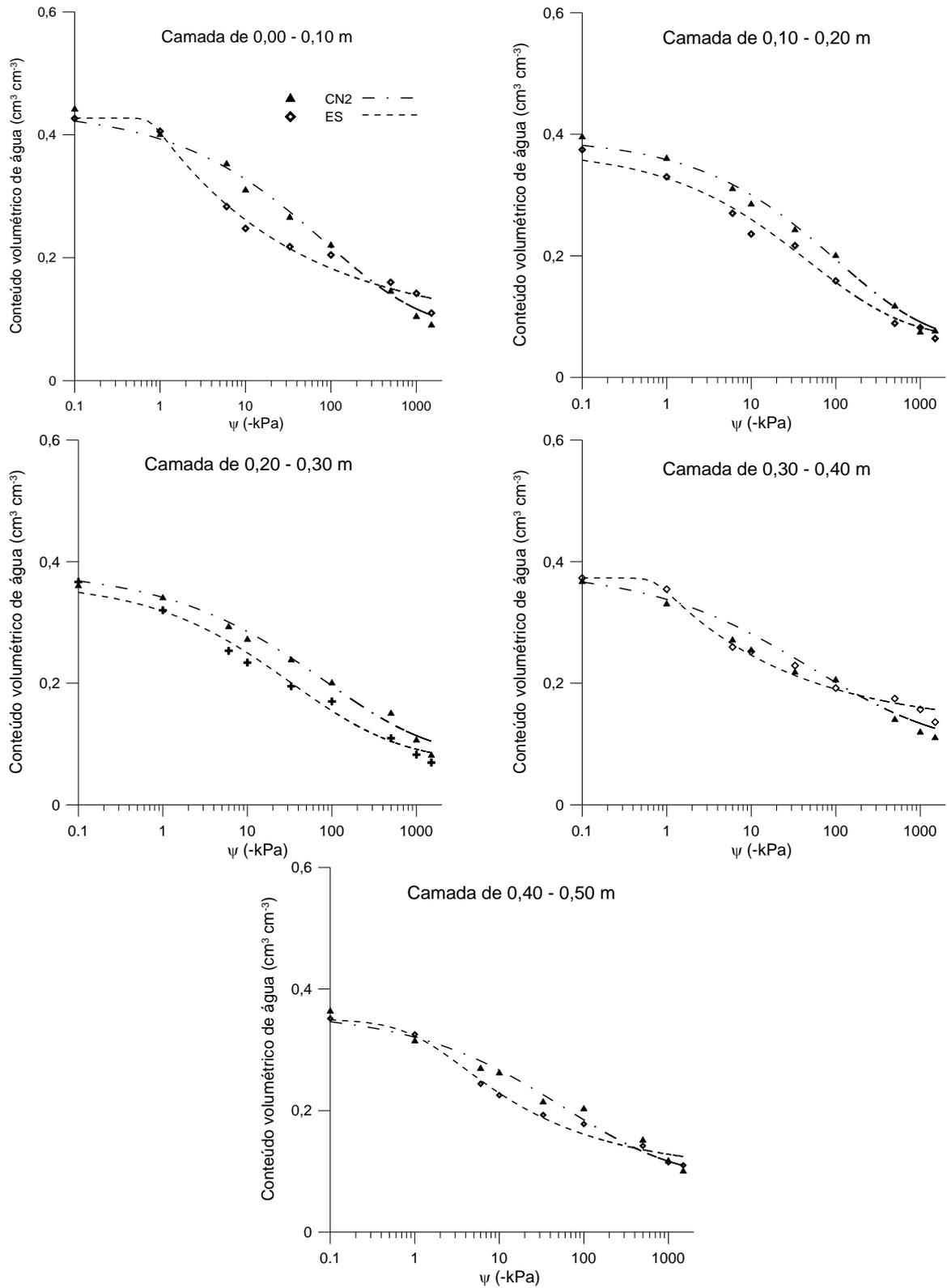


Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo do sítio 2.

CN2: campo nativo 2 e ES: *Eucalyptus saligna*. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

Tabela 9 - Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) obtida pela curva de retenção de água no solo para os diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Área	CC -----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----	PMP	AD -----mm-----
Camada de 0,00 – 0,10 m			
CN1	0,26a	0,10a	16a
EG	0,20a	0,09a	12a
c.v.	17	5	30
CN2	0,30a	0,09a	21a
ES	0,25b	0,09a	17b
c.v.	3	5	5
Camada de 0,10 – 0,20 m			
CN1	0,24a	0,06b	18a
EG	0,26a	0,09a	17a
c.v.	3	5	5
CN2	0,27a	0,06a	22a
ES	0,23a	0,06a	17a
c.v.	7	5	10
Camada de 0,20 – 0,30 m			
CN1	0,26a	0,06b	20a
EG	0,25a	0,10a	15b
c.v.	4	5	11
CN2	0,27a	0,08a	19a
ES	0,23a	0,07a	17a
c.v.	7	5	9
Camada de 0,30 – 0,40 m			
CN1	0,24a	0,08a	16a
EG	0,25a	0,08a	17a
c.v.	6	5	10
CN2	0,25a	0,09a	16a
ES	0,24a	0,10a	14a
c.v.	5	5	7
Camada de 0,40 – 0,50 m			
CN1	0,26a	0,08a	18a
EG	0,25a	0,10a	15a
c.v.	6	5	8
CN2	0,25a	0,09a	16a
ES	0,22a	0,09a	13a
c.v.	9	5	16

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. c.v. = coeficiente de variação (%). Médias seguidas por mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de t em 5% de probabilidade de erro.

A quantidade de água disponível para as plantas (AD) (Tabela 10), considerando a diferença de umidade na CC e no PMP, foi menor na camada

superficial em relação às demais camadas, provavelmente devido à maior quantidade de raízes, as quais favorecem a extração de água mais em superfície e, além disso, Carlesso e Santos (1999) afirmam que esse fato pode ser decorrente da evaporação da água diretamente da superfície do solo.

Em relação ao armazenamento total de água, observa-se maior AD no CN2 e CN1 (94 e 88 mm) em comparação com as áreas sob eucalipto, ou seja, EG (76 mm) e ES (74 mm) (Tabela 10). Entretanto, esses valores revelam que, 69 e 63 % do total de água armazenado, respectivamente, no campo nativo e no eucalipto, encontra-se na faixa potencial extraível às plantas, ou seja, disponível para o seu aproveitamento. Concordando com Carlesso e Santos (1999) que verificaram que 77 % da água armazenada em solo de textura franco arenosa encontrava-se na faixa de água disponível para as plantas. Fiorin et al. (1997) relata que a maior capacidade de armazenamento de água em solo de textura arenosa representa também maior potencial de água extraível às plantas, ou seja, disponível diretamente para a absorção pelas plantas.

Tabela 10 – Valores de armazenamento de água disponível (AD) e quantidade total de água armazenada (QTA) nos diferentes usos do solo avaliados, na camada de 0 a 0,50 m. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS, Brasil.

Variável	Usos do solo			
	CN1	EG	CN2	ES
AD (mm)	88a	76a	94a	74a
QTA (mm)	127a	121a	137a	118a
AD/QTA (%)	69	63	69	63

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. Médias seguidas por mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de t, em 5% de probabilidade de erro.

## 6.4 Retenção e dinâmica da água no solo

### 6.4.1 Retenção e dinâmica da água no solo durante o Verão de 2010

Para que a água fique disponível para ser absorvida pelas plantas é necessário que a mesma infiltre no solo com facilidade, ficando parte retida. A capacidade de retenção de água é uma característica específica de cada classe de solo, sendo resultado da ação conjunta de vários fatores, como a composição granulométrica, a mineralogia, o teor de matéria orgânica, a estrutura (REICHARDT, 1990) e a densidade do solo (BEUTLER et al., 2003). A sua variação ao longo do tempo é influenciada principalmente pelas condições meteorológicas, pelo desenvolvimento das plantas, pelo grau de estruturação do solo e pela quantidade de resíduos sob a superfície (KAISER, 2010).

A retirada da água do solo pelas plantas depende, primeiramente, da configuração do sistema radicular, isto é, da distribuição e ocupação efetiva do perfil do solo pelas raízes finas do sistema radicular, além disso, a penetração das raízes no solo vai depender de diversos fatores ambientais como o estado de compactação, o teor de umidade, a profundidade do lençol freático, entre outros (LIMA, 1996).

A retenção de água variou em função do uso do solo, com maior variação de umidade nas camadas superficiais (0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m), durante a estação do verão (Figura 14a e 14b). Na maior parte do período de monitoramento, a área sob campo nativo 1 (CN1) apresentou maior retenção de água em comparação com a área sob *Eucalyptus grandis* (EG), indicando que nessas condições as gramíneas que compõem o campo nativo, por apresentarem um sistema radicular abundante e vigoroso mais em superfície, resultam em melhoria na estrutura do solo (REINERT et al., 2008), além de aumentarem o aporte de matéria orgânica e a estabilidade de agregados (CAMARGO; ALLEONI, 1997; PREVEDELLO, 2008), influenciando no maior armazenamento de água no solo, devido às menores perdas por evaporação.

No sítio 1, o CN1 foi o tratamento que demonstrou maior conteúdo de umidade do solo na camada superficial (0,00 a 0,20 m) em toda a estação do verão

(Figura 14a). Entretanto, diferiu estatisticamente do EG somente entre os dias 11/01 a 30/01/2010 e 19/02 a 25/02/2010. Ambos os tratamentos apresentaram um volume de água abaixo da capacidade de campo na maior parte da estação, ou seja, entre os períodos de 01/01 a 05/01/2010, 13/01 a 17/02/2010 e 25/02 a 16/03/2010. Nenhum dos tratamentos exibiu umidade próxima ou abaixo do ponto de murcha permanente, provavelmente em decorrência da elevada e frequente precipitação ocorrida em praticamente todo o verão, que foi de 444 mm (Figura 16). Além disso, o solo encontrava-se coberto por vegetação e grande quantidade de resíduos vegetais, tanto na área sob campo nativo quanto sob eucalipto. Silva et al. (2006) relata que a cobertura sobre a superfície do solo diminui o aquecimento excessivo e a perda de água. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 14b), o CN1 apresentou o maior conteúdo volumétrico de água no solo, diferindo estatisticamente do EG entre os dias 19/02 a 16/03/2010.

No sítio 2, o campo nativo 2 (CN2) apresentou maior conteúdo de água no solo na camada superficial (0,00 a 0,20 m) (Figura 14a), quando comparado com o *Eucalyptus saligna* (ES), em praticamente toda a estação do verão. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 14b), o CN2 demonstrou maior retenção de água no solo entre os dias 01/01 a 12/01/2010 em comparação com o ES. Após esse período, o ES foi o tratamento que exibiu maior retenção de água no solo, diferindo estatisticamente somente entre os dias 23/02 a 16/03/2010. Ambos os tratamentos do sítio 2 (CN2 e ES), nas camadas de 0,00 –a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, apresentaram durante a maior parte da estação de verão, conteúdo volumétrico acima da capacidade de campo.

Nas camadas de 0,40 a 0,60 m e 0,60 a 0,80 m (Figuras 15a e 15b), as áreas do sítio 1 e do sítio 2 apresentaram conteúdo volumétrico de água acima da capacidade de campo em toda a estação. Não houve diferença significativa de retenção de água entre as áreas avaliadas em ambos os sítios; entretanto, as áreas sob campo nativo (CN1 e CN2) resultaram em maior conteúdo volumétrico de água no solo em comparação com as áreas de eucalipto (EG e ES). Nessas camadas mais profundas do perfil do solo, ocorre menor variação no conteúdo de água em relação às camadas superficiais, devido ao efeito dos diferentes usos ser menos pronunciado. Isto demonstra que as frentes de umedecimento e secagem do solo nessa estação não chegam a atingir essas camadas, mantendo o teor de água num nível mais estável.

Além disso, podemos concluir que o sistema radicular das culturas avaliadas, tanto as espécies que compõem o campo nativo quanto às espécies de eucalipto, praticamente não extraem água das camadas mais profundas do solo. Lima et al. (1990) e Lima (1996) descrevem que a maior demanda de água do processo de evapotranspiração é suprida pela umidade extraída das camadas superficiais do solo e, à medida que o conteúdo de umidade dessa camada diminui, ocorre uma diminuição proporcional da evapotranspiração, ou seja, as plantas reduzem seu crescimento em função da baixa quantidade de água disponível, mantendo equilibrada a demanda hídrica com a disponibilidade de água no solo. Porém, em virtude da precipitação ter sido abundante e frequente nessa estação (Figura 16), o conteúdo de água das camadas superficiais foi suficiente para suprir as necessidades hídricas das culturas avaliadas.

Em todo o verão houve água disponível nas áreas de campo nativo e para as espécies de eucalipto (Figura 16). A variação da água disponível bem como o conteúdo de água volumétrico nas camadas foi influenciada pelas condições meteorológicas ocorrentes no período. O aumento na quantidade de água disponível ocorreu em função da entrada de água pela precipitação e redistribuição no perfil do solo. No entanto, a saída de água foi devido à extração pelo sistema radicular e pela evapotranspiração das plantas, além de perdas por drenagem de água no perfil do solo.

A evapotranspiração é a soma dos componentes de transpiração, evaporação do solo e a evaporação da água interceptada pela copa (ALMEIDA; SOARES, 2003). Desta forma, quanto maior a temperatura do ambiente e a área foliar das plantas, maior será a perda de água por evapotranspiração. Isso corrobora com o observado, pois o tratamento EG teve a menor quantidade de água disponível no solo, em decorrência da maior demanda evapotranspiratória, provavelmente devido às maiores temperaturas ocorridas na estação de verão e à maior área foliar das plantas de eucalipto desse povoamento (Tabela 3). Isso concorda com McColl (1977), o qual verificou rápida redução da quantidade de água do solo em área de floresta devido à maior taxa de evapotranspiração das árvores na estação seca do verão.

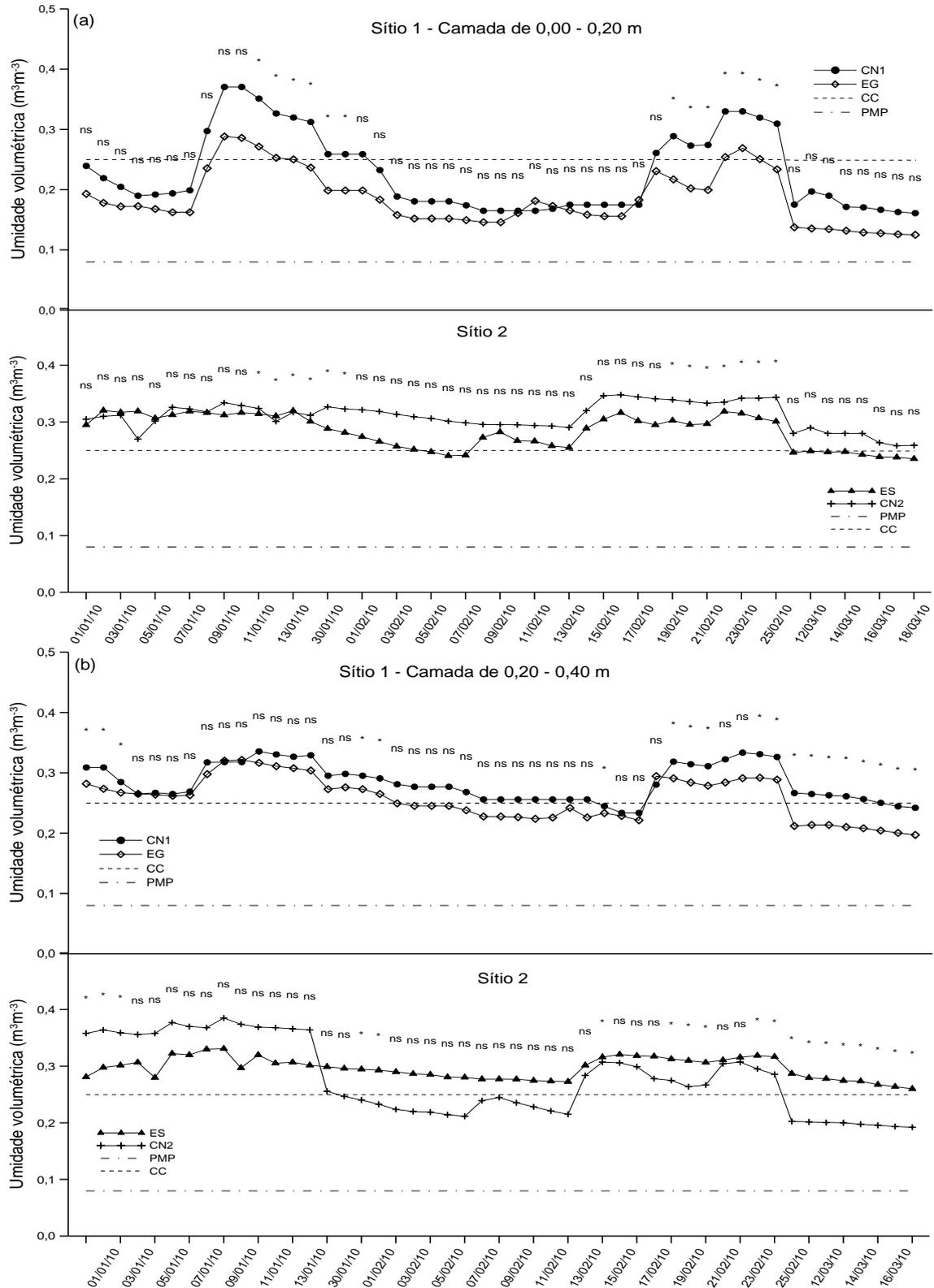


Figura 14 - Umidade volumétrica no Verão nas camadas de (a) 0,00 – 0,20 m e (b) 0,20 – 0,40 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente.\*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

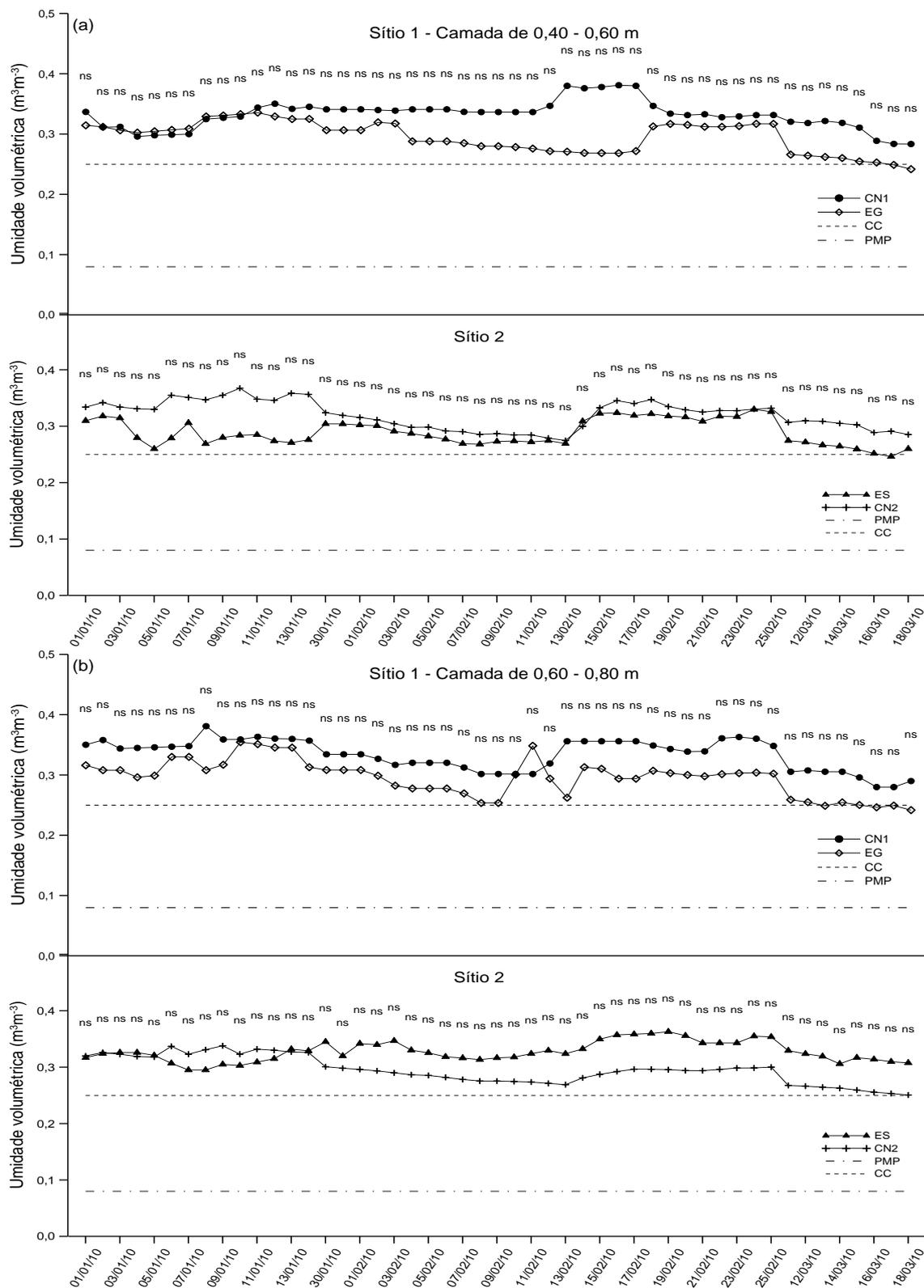


Figura 15 - Umidade volumétrica no Verão nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

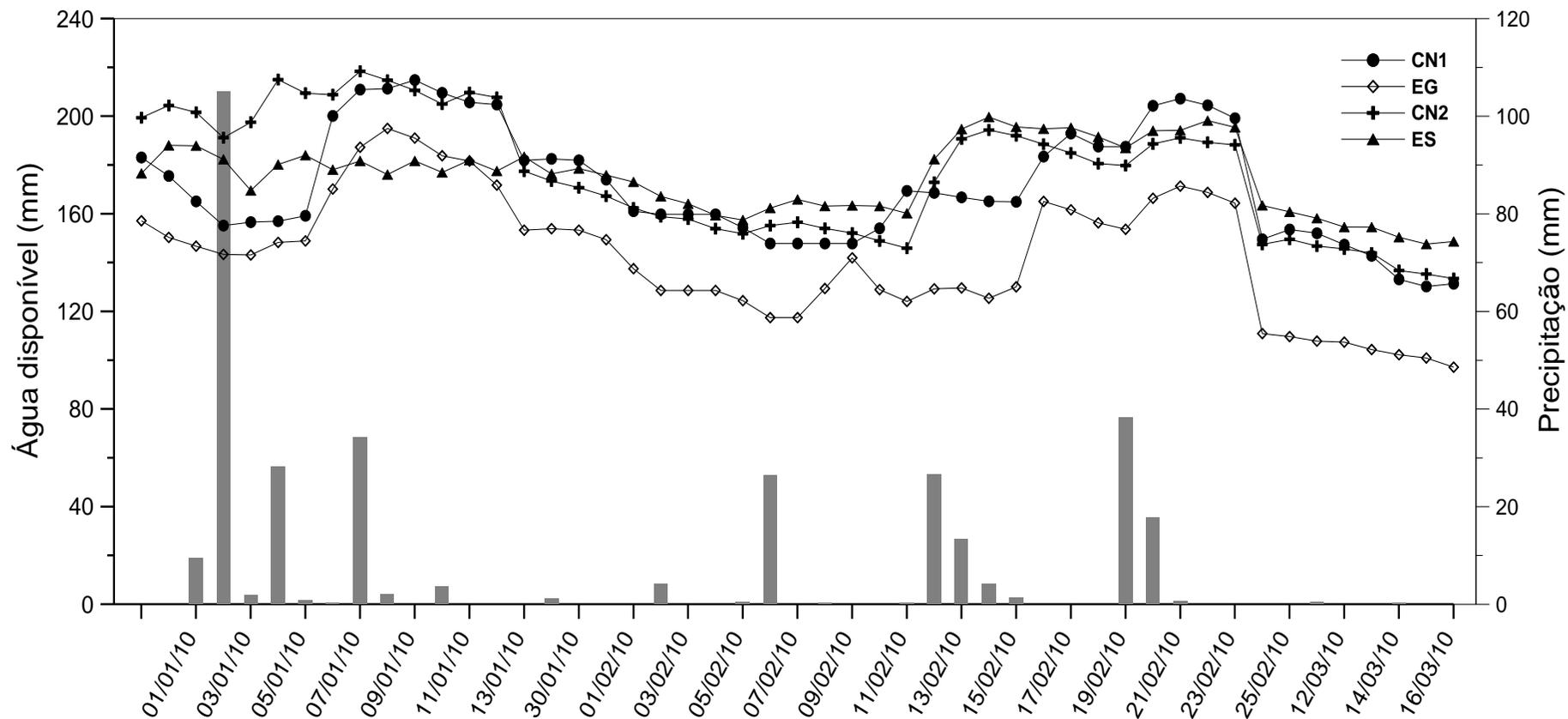


Figura 16 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Verão de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*.

#### 6.4.2 Retenção e dinâmica da água no solo durante o Outono de 2010

No outono, o aumento da umidade do solo na camada superficial (0,00 – 0,20 m) (Figura 17a), em todos os usos, ocorreu em função da precipitação, visualizados principalmente na ocorrência de dois eventos, um no dia 18/04, de 80 mm e outro no dia 16/05, de 63 mm (Figura 19). No sítio 1, a retenção de água na camada superficial foi superior no CN1 e diferiu do EG. O conteúdo volumétrico de água no povoamento EG encontrou-se abaixo da capacidade de campo em praticamente toda a estação, ficando próximo ao ponto de murcha permanente entre os dias 12/04 e 19/04, entretanto, permaneceu na faixa de água disponível para as plantas. O menor conteúdo de água retido no solo sob o EG pode estar relacionado à menor entrada de água da chuva devido à interceptação provocada pela copa das árvores, principalmente em eventos de chuva de baixa intensidade, nos quais a interceptação pelo dossel exerce grande influência na quantidade de água que atinge o solo. Blake (1975) relata que, em pequenos volumes de precipitação, abaixo de 0,3 mm, a floresta retém toda a chuva e em precipitações superiores a 1 mm, de 10 a 40 % pode ficar retido. Assim, o dossel praticamente fechado do povoamento EG pode ter influenciado no decréscimo da entrada e estoque de água no solo, pois o povoamento apresentou cerca de 37 % de biomassa seca de folhas e galhos e a biomassa de madeira e casca de 63 % (Tabela 3).

Na camada superficial do sítio 2 (Figura 17a), o CN2 apresentou um conteúdo de água acima da capacidade de campo em todo o outono e superior ao encontrado no ES, porém, não se verificou diferença estatística entre os dois usos. Pode-se verificar que o ES não seguiu a mesma tendência do EG na camada de 0,00 a 0,20m, apresentando maior quantidade de água retida no solo, provavelmente devido à menor interceptação da água da chuva em função da menor quantidade de biomassa de folhas e galhos nesse povoamento, o qual foi de 18 % e a biomassa de madeira e casca de 82 % (Tabela 4), permitindo, assim, a maior entrada de água que atinge o solo. Wink (2009) verificou que os compartimentos arbóreos de folhas e galhos decrescem em percentual com o passar da idade, porém, os compartimentos de madeira e casca são crescentes com o aumento da idade do povoamento de eucalipto. Poggiani (1980) descreve que o acúmulo de biomassa é mais acelerado na fase juvenil e reduz com a maturidade, em função do balanceamento de energia

utilizada na produção de material vivo e na energia utilizada para a respiração. Assim, na fase juvenil, o crescimento de folhas e galhos é equivalente, mas, à medida que as árvores envelhecem, mesmo a copa apresentando quase a mesma massa vegetal, os galhos aumentam em sentido exponencial ao seu crescimento.

A precipitação total incidente em uma plantação florestal divide-se em três componentes: interceptação, precipitação direta e escoamento de água pelos troncos (SILVEIRA, 1997). Além disso, depende do tipo e da densidade da vegetação que exerce cobertura sobre a superfície. Dessa forma, parte da água interceptada pelas árvores geralmente será evaporada novamente sem atingir o perfil do solo. Almeida e Soares (2003) verificaram que a mata nativa (Mata Atlântica) interceptou cerca de 24 % do total da precipitação, enquanto que no eucalipto este valor foi próximo de 11 %. Em um povoamento de *P. taeda* no nordeste argentino, Caldato (2011) obteve o valor de 26 % de interceptação. Lima e Nicoliero (1983) verificaram perda por interceptação de aproximadamente 12 % em florestas de pinheiros tropicais e cerca de 27 % para o cerrado.

Na camada de 0,20 a 0,40 m do sítio 1 (Figura 17b), o EG resultou em menor conteúdo volumétrico de água em comparação com o CN1, permanecendo abaixo da capacidade de campo entre os dias 19/03 a 22/04/2010, com posterior aumento em função de uma precipitação de 80 mm ocorrida no dia 18/04/2010 (Figura 19). Mesmo não havendo diferença significativa no conteúdo de água entre os usos do solo CN1 e EG, a maior retenção de água verificada na área sob campo nativo provavelmente é decorrente da menor evapotranspiração das gramíneas e da maior concentração do sistema radicular na superfície do solo. De acordo com Silva e Mielniczuk (1997), as raízes das gramíneas exploram um grande volume de solo no perfil, porém, tendem a ficarem concentradas na camada superficial. Ao avaliar as diferenças no conteúdo volumétrico de água no solo entre uma área com floresta de *E. globulus* e outra área de floresta que recebeu corte, na Califórnia, McColl (1977) verificou que o solo da floresta apresentou menor retenção de água, com valores abaixo do ponto de murcha permanente, justificado pela maior evapotranspiração das árvores.

Na camada de 0,40 a 0,60 m não se observou diferença significativa entre os usos do solo, em ambos os sítios, para a estação em estudo (Figura 18a). Todos os tratamentos apresentaram conteúdo volumétrico de água do solo acima da capacidade de campo, em praticamente toda a estação avaliada.

Com o aumento da profundidade no solo (camada de 0,60 a 0,80 m), verifica-se maior quantidade de água retida em todos os usos (Figura 18b). Isso pode estar relacionado às características morfológicas do Argissolo, devido ao aumento do teor de argila com a profundidade (Tabela 2), favorecendo a retenção de água nessa camada. REICHERT et al. (2009b) encontraram correlação positiva entre o conteúdo de água e os teores de argila, silte e matéria orgânica do solo. Vogelmann et al. (2009), estudando um Argissolo Vermelho-Amarelo, também verificaram aumento no conteúdo de argila nessa camada, associado a uma brusca redução da condutividade hidráulica do solo saturado, condicionando um lento processo de drenagem da água a partir dessa camada mais argilosa.

A variação na quantidade de água disponível no solo esteve diretamente ligada às condições meteorológicas predominantes ocorridas no outono (Figura 19). Até o dia 19/04 o conteúdo de água no solo sofreu queda progressiva devido à baixa ou ausência de precipitação. Contudo, com a ocorrência de chuva no dia 20/04, houve um aumento de água armazenada para todos os usos. O ES foi o povoamento que reteve maior quantidade de água no perfil, com uma variação de 143 a 204 mm de lâmina de água disponível, enquanto que o EG foi o povoamento com menor retenção, variando de 84 a 156 mm. Essa diferença de retenção ocorrida entre os dois povoamentos florestais pode estar relacionada com a idade dos eucaliptos e, conseqüentemente, com a fase de crescimento das árvores, ou seja, por estar entre o terceiro e quarto ano o EG está em plena atividade de crescimento e metabolismo mais vigoroso, uma vez que nessa fase, ocorrem as maiores necessidades hídricas das árvores de eucalipto (MENDES; LIMA, 1997; OLERIANO; DIAS, 1997). Além disso, a maior área foliar das árvores do povoamento EG pode ter favorecido a maior interceptação da água da chuva, reduzindo a quantidade de água que atinge o solo.



Figura 17 - Umidade volumétrica no Outono nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murchar permanente.\*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

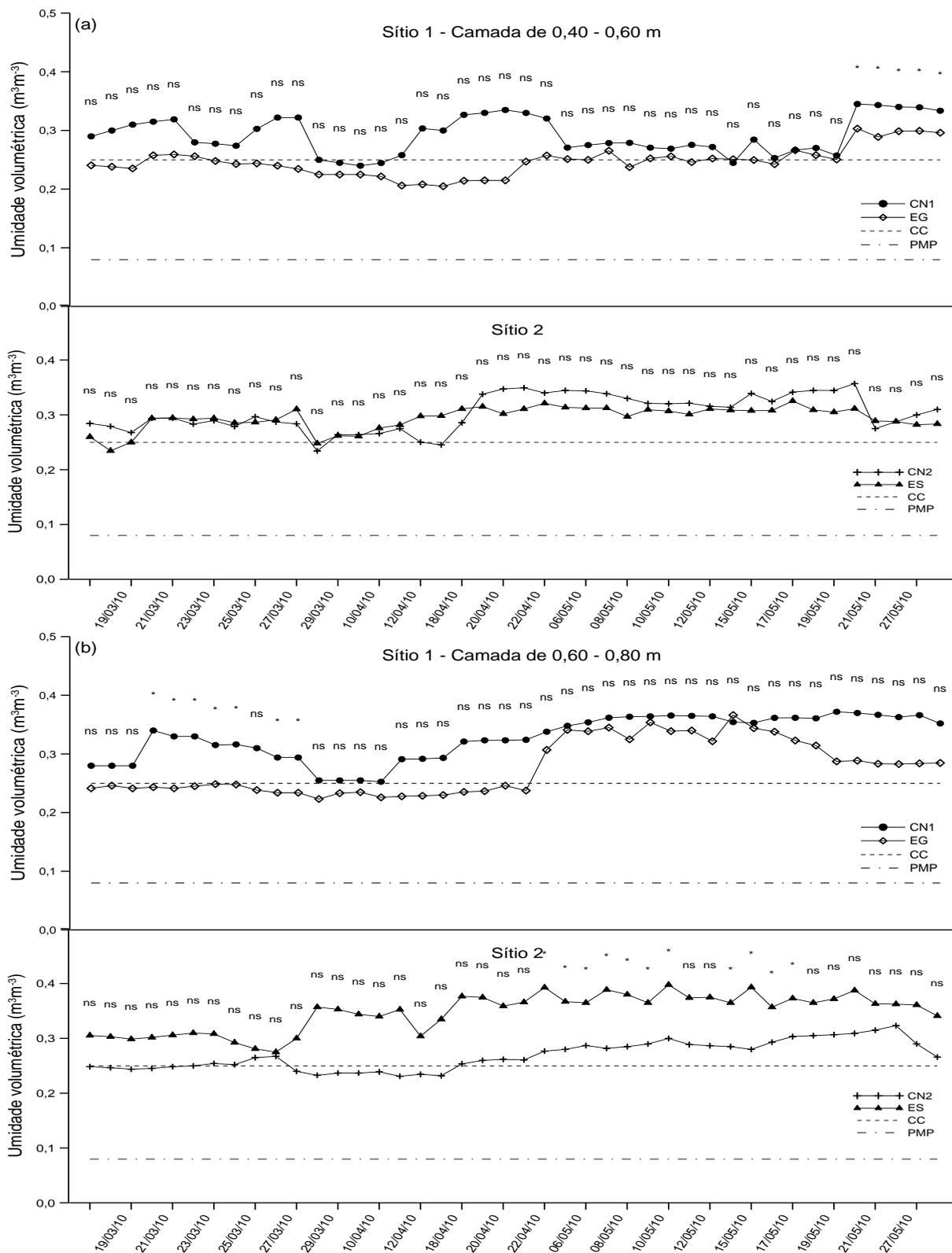


Figura 18 - Umidade volumétrica no Outono nas camadas de (a) 0,40 – 0,60 m e (b) 0,60 – 0,80 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

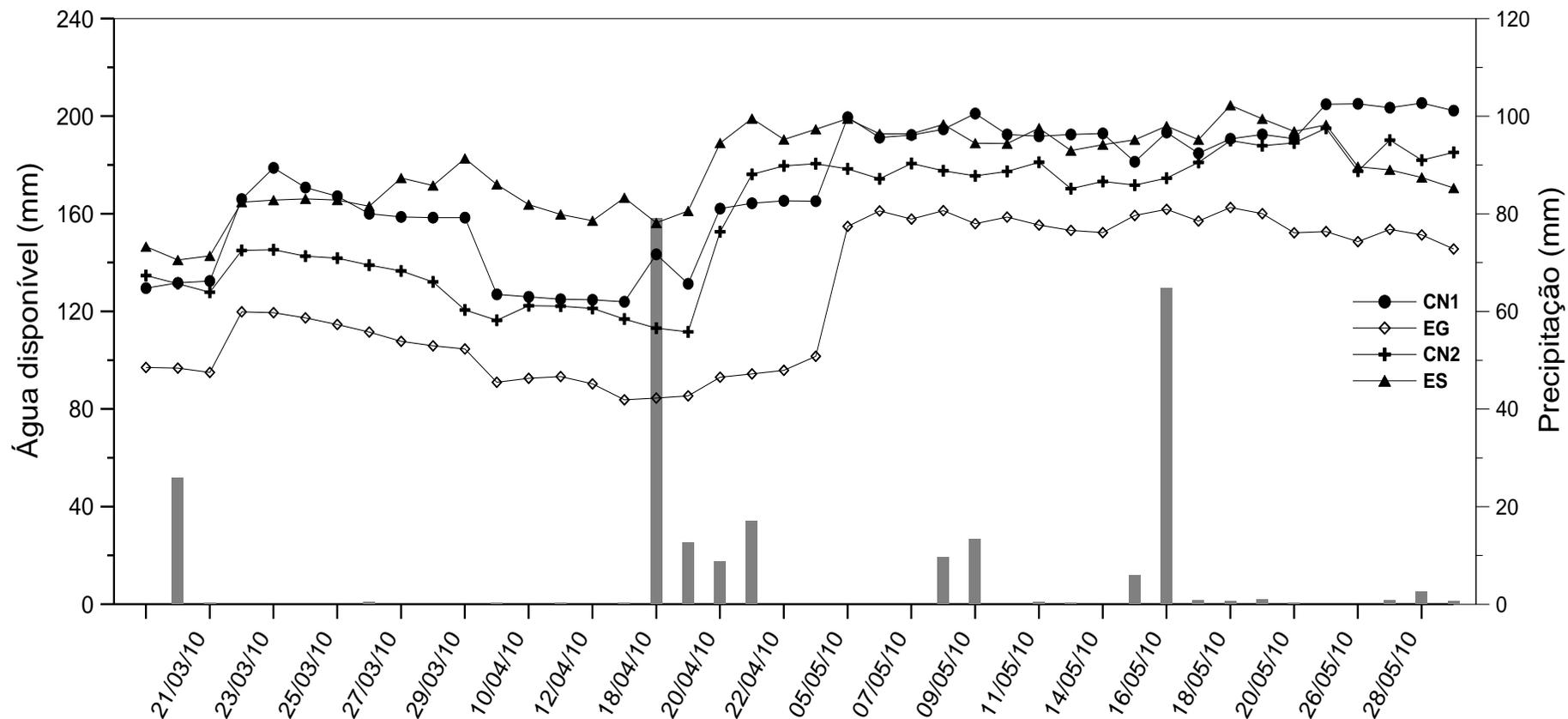


Figura 19 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Outono de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*.

### 6.4.3 Retenção e dinâmica da água no solo durante o Inverno de 2010

O conteúdo volumétrico de água no solo para a estação do ano de inverno na camada superficial (0,00 a 0,20 m) (Figuras 20a e 20b) foi praticamente constante para todos os usos do solo devido às altas precipitações que ocorreram ao longo da estação (Figura 22). Nessa camada, tanto no sítio 1 quanto no sítio 2, os solos sob os povoamentos de eucalipto, EG e ES, resultaram em menor retenção de água no solo quando comparado com os solos sob campo nativo (CN1 e CN2). Como exposto anteriormente, admite-se que as florestas, em geral, consomem anualmente mais água devido a maior evapotranspiração do que outros tipos de vegetação rasteira. Assim, em função da maior evapotranspiração, a floresta tende a reduzir a recarga e os escoamentos subterrâneos e, conforme estudo desenvolvido por Alves e Pereira (1990), povoamentos de *E. globulus* têm, certamente, consumo de água mais elevado que qualquer outro tipo de vegetação rasteira. Entretanto, Lima e Freire (1976) não encontraram efeito adverso sobre o regime de água do solo como consequência do reflorestamento com eucalipto e com pinheiros em comparação com a vegetação herbácea natural, comprovado pela taxa de evapotranspiração idêntica entre os povoamentos florestais e a vegetação natural.

Essas diferenças no conteúdo volumétrico de água no solo entre as culturas avaliadas foram mais pronunciadas na camada superficial do solo e, conforme relatam Lima e Freire (1976), o sistema radicular do eucalipto geralmente é bastante denso na superfície, o que permite inferir que essa espécie absorve mais água nas camadas superficiais, resultando em efeito reduzido sobre a absorção da água em camadas mais profundas. Além disso, como o Inverno foi chuvoso, com uma precipitação acumulada de 427 mm bem distribuída ao longo de toda estação (Figura 22), os povoamentos de eucalipto e as áreas de campo nativo apresentaram equilíbrio entre a oferta (precipitação) e a demanda (evapotranspiração), ou seja, toda a água extraída do solo necessária para o seu crescimento, foi em seguida, suprida pela precipitação pluviométrica. Não foram observadas diferenças significativas no conteúdo total de água armazenada entre os usos. Essa afirmação pode ser constatada também nas camadas 0,20 a 0,40, 0,40 a 0,60 m (Figuras 20b e 21a, respectivamente), onde as áreas avaliadas apresentaram conteúdo de água acima da capacidade de campo em praticamente toda a estação.

Na camada de 0,60 a 0,80 m, assim como nas camadas mais superficiais, todos os tratamentos avaliados apresentaram conteúdo de água volumétrico acima da capacidade de campo na maior parte da estação.

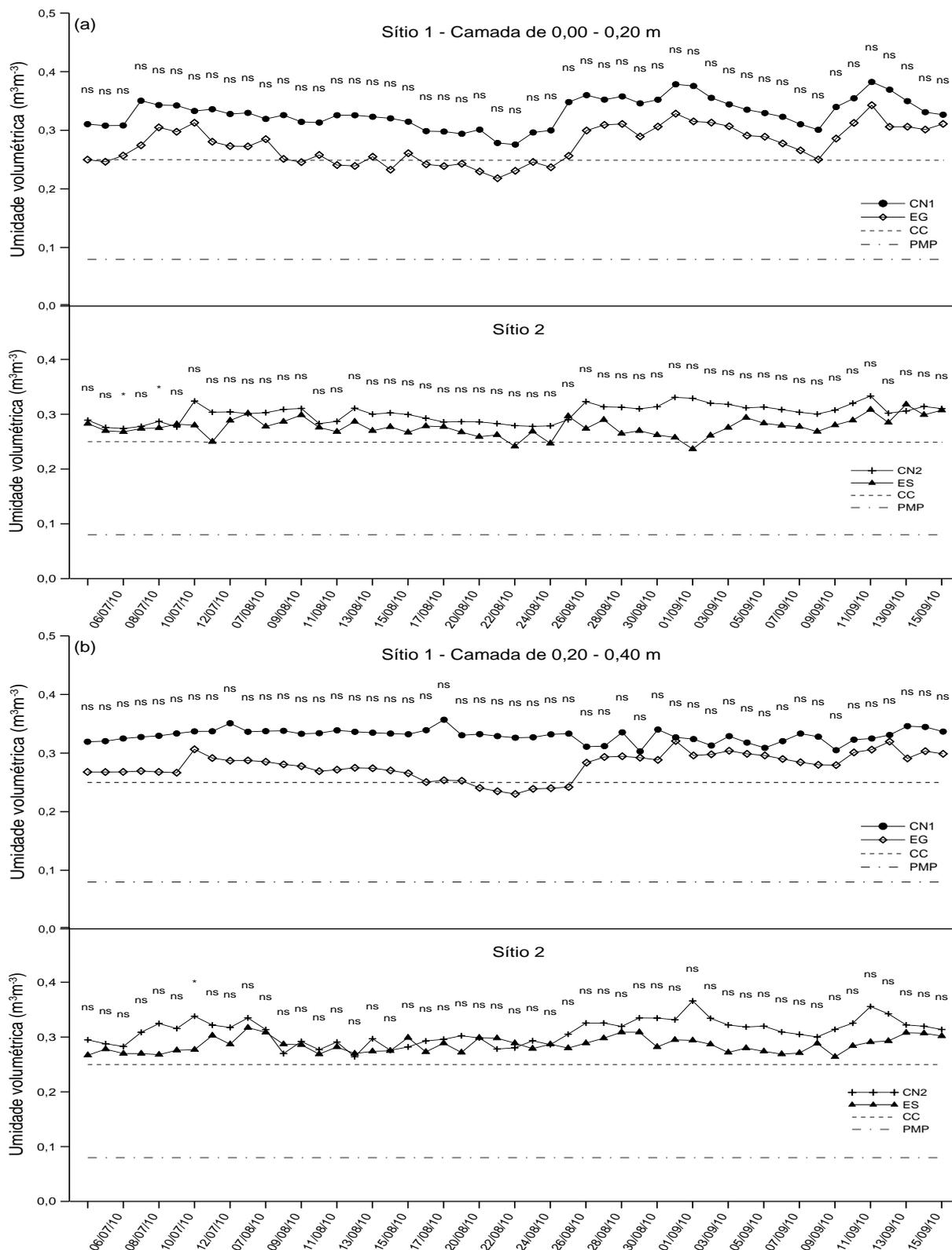


Figura 20 - Umidade volumétrica no Inverno nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

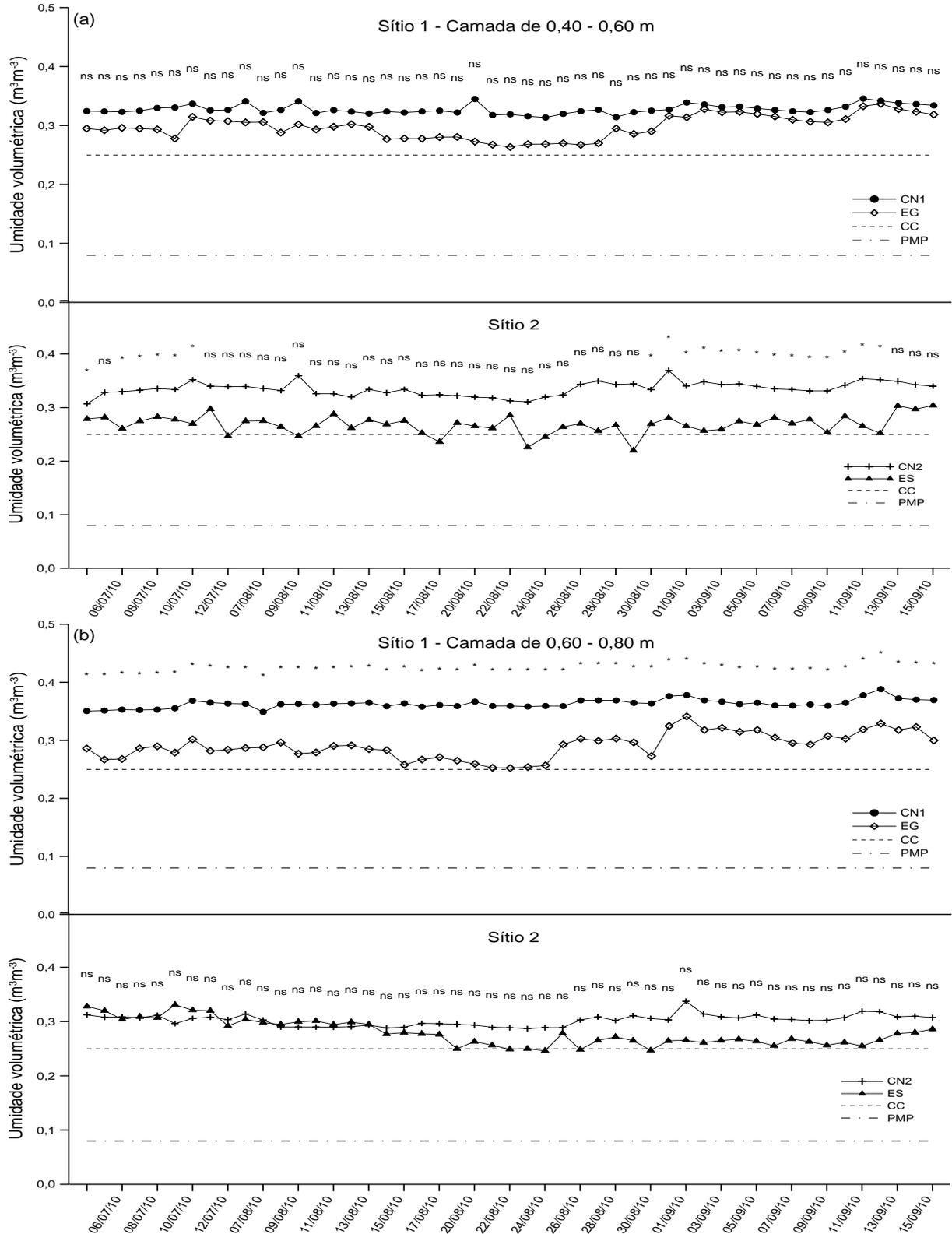


Figura 21 - Umidade volumétrica no Inverno nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcho permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

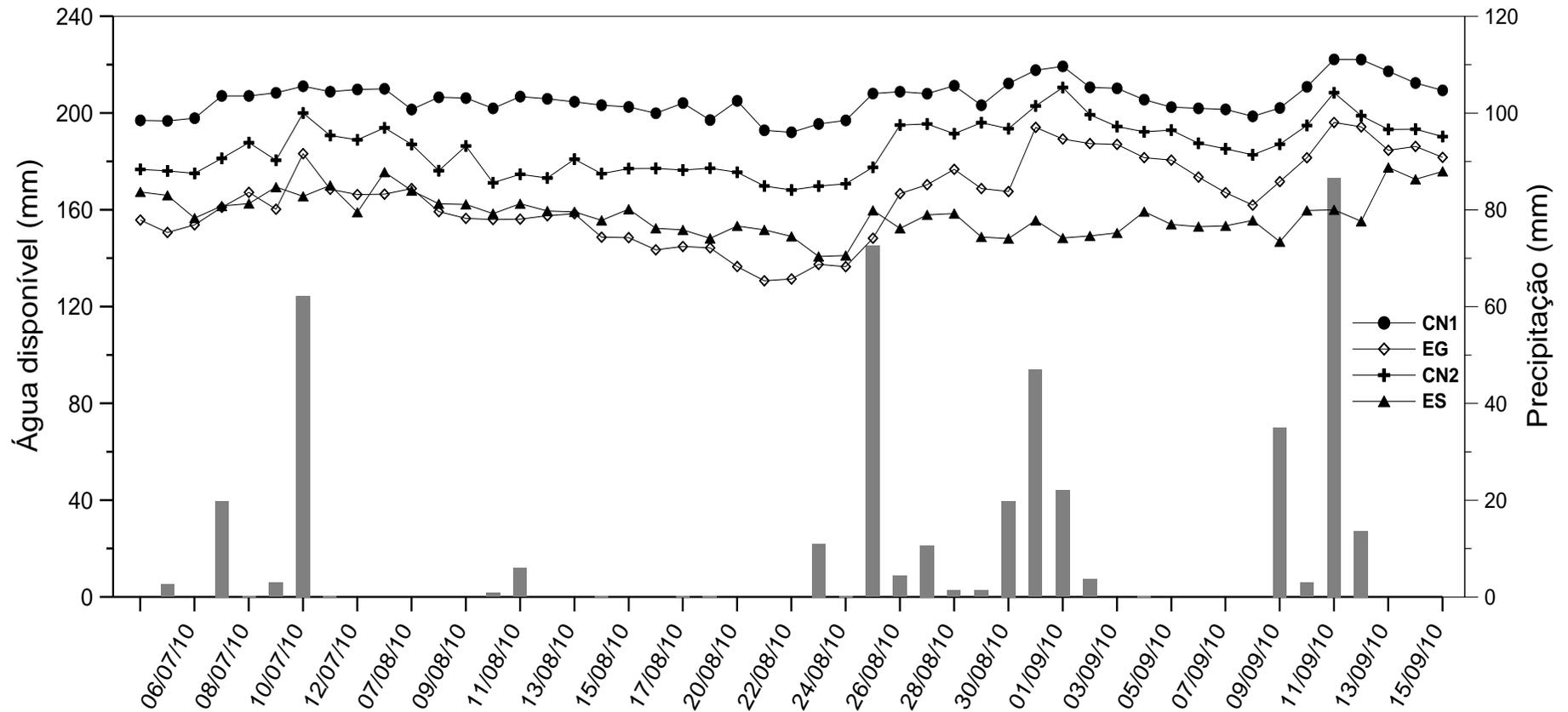


Figura 22 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica no Inverno de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.

CN1: campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*.

#### 6.4.4 Retenção e dinâmica da água no solo durante a Primavera de 2010

Na primavera, o conteúdo de água no solo, assim como nas demais estações, foi diretamente influenciado pela precipitação (Figura 25). A umidade volumétrica apresentou redução progressiva ao longo do período em todos os usos do solo, ou seja, no início da estação da primavera foi verificada uma maior quantidade de água provavelmente em função da alta umidade acumulada no inverno, devido à elevada precipitação. Entretanto, como a reposição da água do solo é realizada pela precipitação pluviométrica e esta foi reduzida na primavera, com um total de 96 mm, observou-se uma redução progressiva da umidade do solo ao longo dos dias.

As diferenças no conteúdo de água no solo entre os tratamentos na camada superficial (0,00 – 0,20 m), na estação da primavera, estiveram associadas ao sítio e ao uso do solo (Figura 23a). No sítio 1, pode-se verificar diferença estatística entre o EG e CN1 durante os dias 18/09 a 26/09/2010 e nos dias 21/11 a 27/11/2010, provavelmente em função da ocorrência de eventos de chuva (Figura 25). Como esses eventos foram de baixa intensidade, a maior quantidade de biomassa aérea do EG em relação ao CN1 favorece a maior interceptação da água da chuva. Lima (1996) esclarece que durante eventos de chuva leves ocorre maior perda por interceptação relacionado com as espécies que possuem maior índice de área foliar. Além disso, Whitehead e Breadle (2004) e Martins et al. (2008) descrevem que a maior quantidade de biomassa foliar aumenta a transpiração e, conseqüentemente, o consumo de água pelas plantas.

No sítio 2, os tratamentos CN2 e ES não diferiram significativamente entre si, porém apresentaram maior quantidade de umidade retida no solo quando comparado com os tratamentos que compõem o sítio 1. Isso pode ser devido aos os tratamentos EG e CN1 apresentarem menor densidade e maior porosidade total até a profundidade de 0,20 m (Tabela 5), propriedades do solo que favorecem a infiltração, porém, resultam em menor retenção de água no solo em função da alta macroporosidade, afirmação confirmada pela figura 23a, onde esses tratamentos apresentaram menor umidade volumétrica.

Nas camadas de 0,20 a 0,40 m, 0,40 a 0,60 e 0,60 a 0,80 m houve diferença significativa no conteúdo volumétrico do solo somente entre os tratamentos que compõem o sítio 1 (EG e CN1) entre os dias 26/09 e 23/11/2010 (Figuras 23b, 24a e

24b, respectivamente), sendo que o menor conteúdo de água armazenado foi verificado no tratamento EG. A quantidade de água no solo em todas as camadas seguiu a tendência da camada superficial, ou seja, no início da estação havia um elevado acúmulo de água que decresceu ao longo do período. Entretanto, com o aumento da profundidade do solo percebe-se uma maior quantidade de água armazenada.

Em toda a estação da primavera, mesmo em condições de chuva escassa e em solo de textura arenosa, o solo nos diferentes usos não apresentou umidade abaixo do ponto de murcha permanente. Essa tendência é muito importante, pois a elevação da temperatura na primavera e no verão proporciona à ativação do câmbio e o conseqüente crescimento das árvores. Em decorrência disso, a falta de água pode limitar o crescimento e desenvolvimento das árvores nessa estação. Entretanto, em regiões de clima temperado, idêntico ao do Rio Grande do Sul, o câmbio cessa sua atividade nos períodos de temperaturas mais baixas (Da GLÓRIA; GUERREIRO, 2006), as quais são verificadas principalmente nas estações do outono e inverno. Dessa forma, a baixa disponibilidade de água no solo não resultaria em baixa produtividade das culturas nessas estações.

Solos de textura franco arenosa apresentam maior capacidade de armazenamento de água disponível para as plantas (CARLESSO, 1995), indicando que a limitação de água em solos arenosos não é tão intensa quanto citado (CARLESSO; SANTOS, 1999). Essa afirmação pode ser constatada nos resultados desse trabalho, pois, mesmo em estações com baixa precipitação pluviométrica, verificou-se que a quantidade de água disponível para as plantas não decaiu em condições limitantes. Diante disso, a figura 25 apresenta a quantidade de água disponível para as plantas e a precipitação ocorrida ao longo da estação da primavera. Assim pode-se verificar a escassez de chuva e a conseqüente redução da quantidade de água no solo independentemente do uso nessa estação, porém sem atingir valores limitantes ao desenvolvimento das plantas, sendo o EG o tratamento que apresentou menor quantidade de água disponível, variando de 167 a 90 mm de lâmina, seguido do CN2, com variação de 195 a 109 mm de lâmina de água disponível.

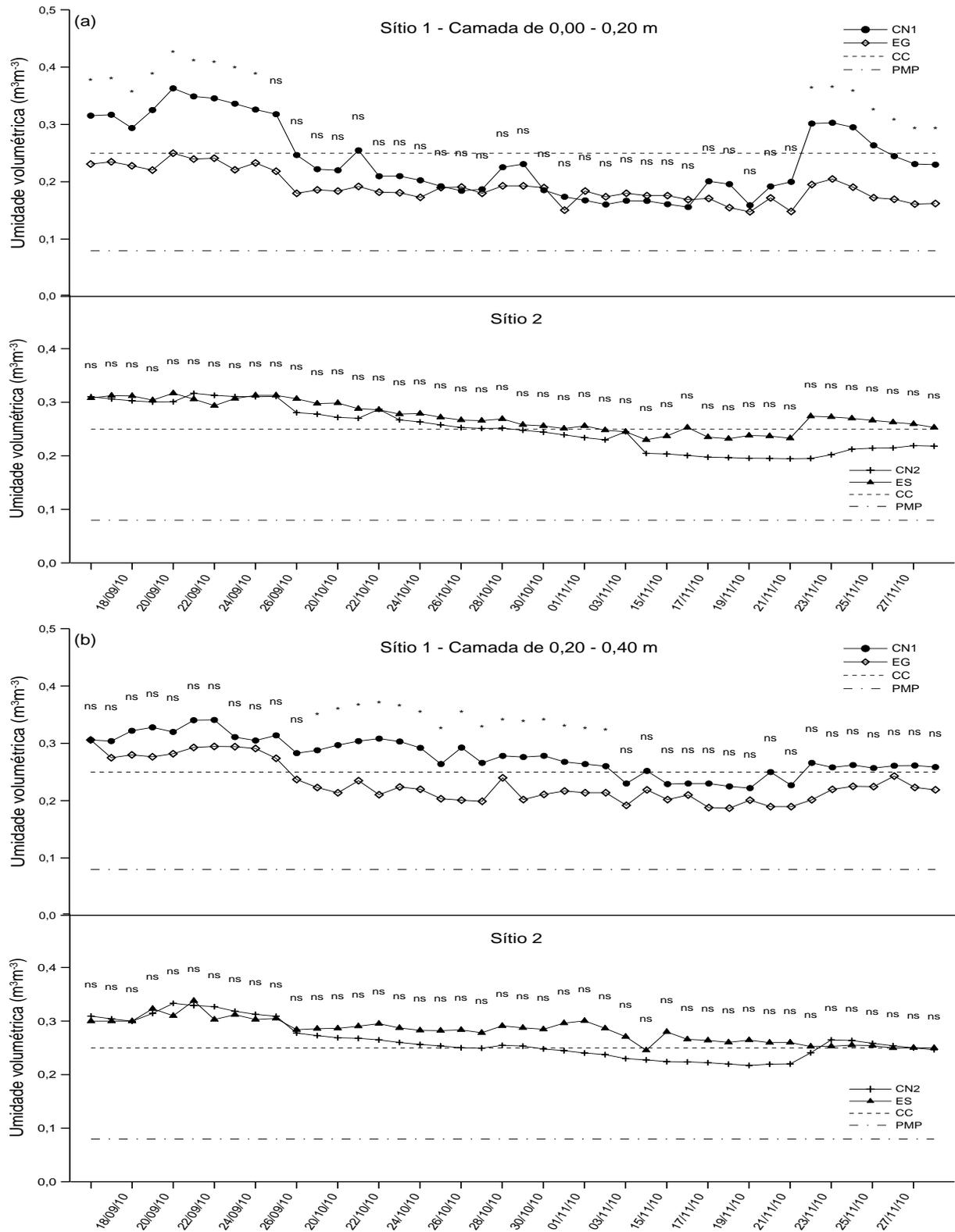


Figura 23 - Umidade volumétrica na Primavera nas camadas de (a) 0,00 a 0,20 m e (b) 0,20 a 0,40 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

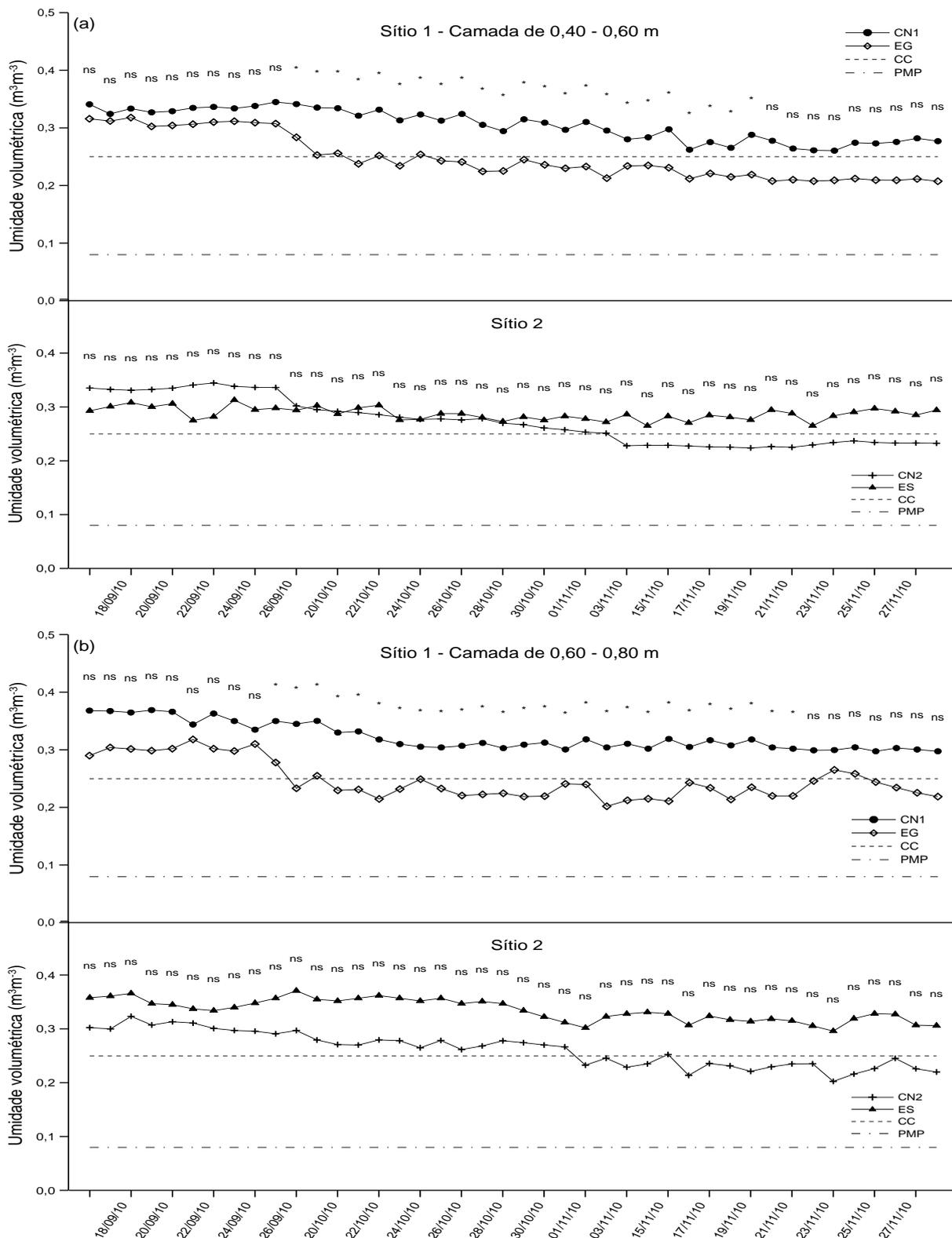


Figura 24 - Umidade volumétrica na Primavera nas camadas de (a) 0,40 a 0,60 m e (b) 0,60 a 0,80 m para os diferentes usos do solo.

CN1: Campo nativo 1; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: Campo nativo 2; ES: *Eucalyptus saligna*. CC: umidade média na capacidade de campo e PMP: umidade média no ponto de murcha permanente. \*: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. ns: não significativo.

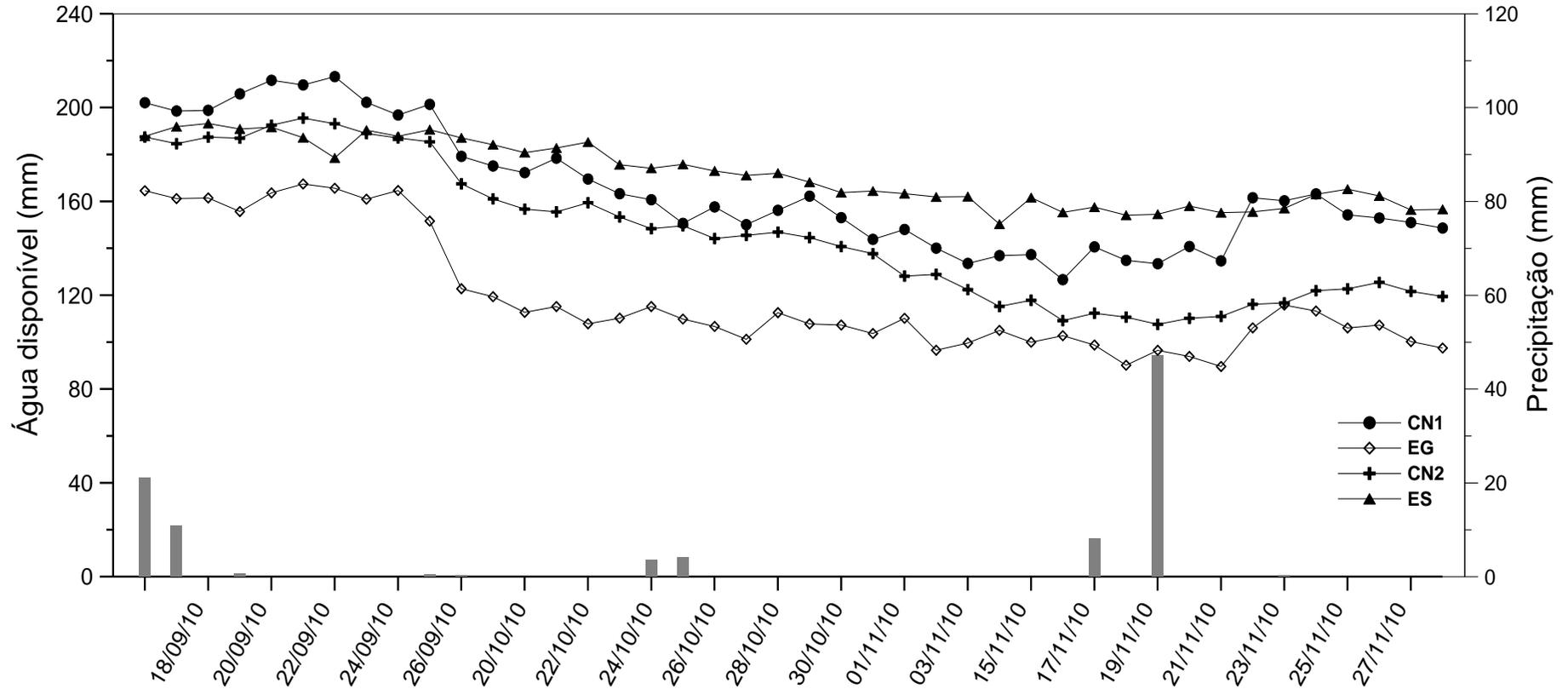


Figura 25 - Água disponível no solo na camada de 0,00 a 0,80 m e precipitação pluviométrica na Primavera de 2010, nos diferentes usos do solo. FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria-RS.

CN1: campo nativo próximo ao EG; EG: *Eucalyptus grandis*; CN2: campo nativo próximo ao ES; ES: *Eucalyptus saligna*.



## 7 CONCLUSÕES

A substituição do campo nativo pelo cultivo do eucalipto não altera negativamente a densidade, a macroporosidade, a microporosidade e a porosidade total, a condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade do solo ao ar.

O uso do solo sob campo nativo e eucalipto contribuem para a melhoria da qualidade estrutural, pois favorecem a formação de poros contínuos, importantes para uma adequada aeração, retenção e condução de água.

O efeito antrópico derivado da substituição da vegetação nativa, o campo nativo, por povoamentos de eucalipto não altera significativamente a capacidade de armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, não reduz a quantidade de água disponível às plantas.

Do total de água armazenada para as áreas de campo nativo e de eucalipto, 69 e 63 %, respectivamente, encontram-se na faixa potencial extraível às plantas, ou seja, prontamente disponível para o seu aproveitamento.

O solo de textura franco arenosa, ao longo do ano, não sofre efeito adverso sobre o regime hídrico em função do reflorestamento com eucalipto em comparação com a vegetação de campo nativo e, portanto, não ocorre esgotamento da água do solo em locais com monocultivos de eucalipto.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2009**. Brasília. 2010. Disponível em: <(http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp)>. Acesso em: 6 de Novembro de 2011.

ABRÃO, P. U. R.; GIANLUPPI, D.; AZOLIN, M. A. D. **Levantamento semidetalhado dos solos da estação experimental de silvicultura de Santa Maria**. Porto Alegre, 1988. (Publicação IPRNR, n. 21).

ABRÃO, S. F. **Alterações físicas e químicas de um cambissolo húmico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria. 2011.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre o uso da água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta umbrófila densa (Mata Atlântica). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, mar./abr. 2003.

ALVES, A. A. M.; PEREIRA, J. M. S. **Impactes ambientais e sócio-económicos do eucaliptal em Portugal**. Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 1990, 193 p.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Piracicaba, v.26, n.1, p.27-34, jan./mar., 2004.

ANDRADE, E. N. de. **O Eucalipto**. Companhia Paulista de Estradas de Ferro, Jundiaí, SP. 1961. 667 p.

ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 320p.

BALBINOT et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p.131-149, jan./abr. 2008.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H. & TOPP, C., eds. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, p. 1141-1158. 2002.

BEUTLER et al. Perdas de solo e água em Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 509-517, maio/jun. 2003.

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

BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropore and water flow in soil. **Water Resources Research**, v. 18, n. 5, p. 1311-1325, july. 1982.

BLAKE, G. J. The interception process. In: **Prediction in catchment hydrology**. Australian Academy of Science. 1975. 482p.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 2, p. 438-441, mês.1982.

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

BRAIDA et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 222-227, 2011.

BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2009. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

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).

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, jan. 2005.

CALDATO, S. L. **Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino**. 2011. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1997.132 p.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, jan./abr. 1995.

CARLESSO, R. Disponibilidade de água no Solo. In: FRIES, M.R. **Plantio direto em solos arenosos: Alternativas de manejo para a sustentabilidade agropecuária**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,1998. 103 p. p.21-51.

CARLESSO, R.; SANTOS, R. F. Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 2, n. 3, p. 287-294, jul./ago., 1999.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, São Paulo, 2002.

CAVENAGE et al. Alterações nas propriedades 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.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v. 20, p. 2-76, 1992.

CORCINI, A. L. M. Variação temporal da estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

Da GLÓRIA, B. A.; GUERREIRO, S. M. C. **Anatomia vegetal**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2006. 438 p.

DIAS JUNIOR et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, out./dez. 1999.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W., COLEMAN, D. C., BEZDICEK, D. F., STEWART, B. A. (Eds.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Special Publication 35, Soil Science Society of America, Madison, WI. p. 3-21. 1994.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ESPÍRITO SANTO, F. R. **Retenção e transmissão de água em um latossolo roxo sob diferentes sistemas de cultivo**. 1998. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queirós", Piracicaba. 1998.

FAO. **El eucalipto en la repoblación forestal**. Roma, 1981. 303p.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo, In: LIER, Q. de J. van. **Física do solo**, Viçosa: SBCS, p. 1-28. 2010.

FIORIN, J. E.; REINERT, D. J. ; ALBURQUERQUE, J. A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 249-255, abr./jun. 1997.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

GENT, J. A. et al. Impact of harvesting and site preparation on physical properties of Piedmont forest soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 173-177, jan. 1984.

GIORDANO, E. Osservazioni sull'apparato radicale dell'*Eucalyptus globulus* Labill. **Publicazioni del Centro di Sperimentazioni Agricola e Forestale**, n.10, p. 135-147. 1969.

GONÇALVES et al. Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002, cap. 3, p. 131-204.

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

GREENWOOD, E. A. N. et al. Evaporation from vegetation in landscape developing secondary salinity using Ventilad Chamber Technique. IV evaporation from a regenerating forest of *Eucalyptus wandoo* on Land Formerly Cleared for Agriculture. **Journal of Hydrology**, v. 58, n. 3, p. 357-366. 1982.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009. Natal, **Anais...** Natal: INPE, p. 7709-7716, 2009.

GUBIANI et al. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 993-997, maio/jun. 2010.

GUERRA et al. Compactação do solo e déficit hídrico no comportamento do sistema radicular de mudas de *Eucalyptus grandis*. In: Congresso de Iniciação Científica 1, 1999. Botucatu, **Resumos/Biológicos...** Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1999. p 247.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 71-85, jan. 2000.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. **Chave de Identificação de Espécies Florestais (CIEF)**. Piracicaba, SP. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/lista.asp>>. Acesso em: 11/02/2011.

INCOLL, W. D. Root system investigation in stands of *Eucalyptus regans*. **Forestry Technical Paper**. Victoria Forest Commission, n. 27, p. 23-32. 1979.

JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 1005-1014, jul./ago. 1999.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KARLEN et al. Soil quality: Humankind's foundation for survival a research editorial by conservation professionals. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 58, n. 4, p. 171-179, jul/ago. 2003.

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

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of Soil Analysis**. I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, p. 635-662. 1986.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Part 1. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, p.687-732, 1986.

KOBIYAMA, M. Manejo de bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: Curso de Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. **Apostila**, Curitiba: FUPEF, 1999. p. 29-31.

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

LIMA, W. P. Overland flow and soil and nutrient losses from eucalyptus plantations. **IPEF International**, Piracicaba, n. 1, p. 35-44, 1990.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2 ed. São Paulo: EDUSP, 1996. 302 p.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2 ed. Piracicaba, dez. 2008. 245 p.

LIMA, W. P.; FREIRE, O. Evapotranspiração em plantações de eucalipto e pinheiro e em vegetação herbácea natural. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 12, n. 1, p.103-117, jun. 1976.

LIMA, W. P.; NICOLIERO, N. Precipitação efetiva e interceptação em florestas de pinheiros tropicais e em reserva de cerrado. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, volume, v. 24, n. 2, p. 43-46, ago. 1983.

LIMA, W. P.; REICHARDT, K. **Regime da água do solo sob florestas homogêneas de eucalipto e de pinheiro**. Piracicaba: CENA/USP, 1977. 31 p. (Boletim Científico, 043.31).

MADEIRA, M. **Influência de povoamentos de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) no solo, comparativamente aos povoamentos de Sobreiro (*Quercus suber*) e de Pinheiro (*Pinus pinaster*)**. 1989. Tese de Doutorado. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. 1989.

MAHESHWARI, B. L. Interrelations among physical and hydraulic parameters of non-cracking soils. **Journal of Agricultural Engineering Research**. United Kingdom, v. 68, n. 4, p. 297-309. dec.1997.

MAIA, C. M. B. F.; DEDECEK, R. A.; MALUCELLI, C. S. **Identificação de repelência à água em solos sob plantios florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 6 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 147).

MARTINS et al. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biofósforo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 207-218, jun. 2004.

MARTINS et al. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1297-1306, maio/jun. 2008.

McCOLL, J. G. Retention of Soil Water Following Forest Cutting. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 5, p. 984-988. 1977.

McQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Tillage Research**, v. 25, n. 3-4, p. 93-107, 2002.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M.; OLIVEIRA, L. E. G. Características do sistema radicular de povoamento de eucaliptos propagados por sementes e estacas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 54, p. 17-28, dez. 1998.

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

MENDES, C. A. B.; LIMA, W. P. Análise de impactos ambientais de florestas plantadas, no contexto de bacias hidrográficas: princípios norteadores. In: I

Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico. **Anais...** Taubaté, SP. p. 263-270, nov. 2007.

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.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, SP. Sociedade Brasileira de Silvicultura, 112 p. 2000.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.

NAMBIAR, E. K. S. Ecological and physiological aspects of the development of roots: from nursery to forest. In: AUSTRALIAN FOREST NUTRITION WORKSHOP, Melbourne, 1981. **Proceedings...** Melbourne: CSIRO, 1981. p. 117-129.

OADES, J.M. Mucilages at root surface. **Journal of Soil Science**, London, v. 29, p. 1-16, mar. 1978.

OLERIANO, E. S.; DIAS, H. C. T. A dinâmica da água em microbacias hidrográficas reflorestadas com eucalipto. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico. **Anais...** Taubaté, SP. p. 215-222, nov. 2007.

PIELOU, E. C. **Fresh Water**. The University of Chicago. Press. 275 p. 1998.

PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento). **Relatório do Desenvolvimento Humano 2006: A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água**. New York, USA. 2006.

POGGIANI, F. Florestas para fins energéticos e ciclagem de nutrientes. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. 1-11, jul. 1980.

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

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 486p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole. 478p. 2004.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, jul./dez. 2003.

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

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

REICHERT, et al. Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, n.6, p. 1547-1560, nov./dez. 2009b.

REINERT, D. J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L. E.; VARGAS, J. W. M. **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa, p. 163-176. 1998.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo protótipos e testes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, nov./dez., 2006.

REINERT et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 32, n. 5, p. 1805-1816. set./out. 2008.

RIBEIRO et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago., 2007.

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

ROSA, S. F. **Propriedades físicas e químicas de um solo arenoso sob o cultivo de *Eucalyptus spp.*** 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) -

Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina. DF: Embrapa Cerrados. 2005. 24 p.

SAS INSTITUTE. **Getting started with the SAS learning edition**. Cary: SAS, 2002. 200p.

SCARPINELLA, G. D. A. **Reflorestamento no Brasil e o protocolo de Quioto**. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle**. Piracicaba: IPEF, 1988. p.1-10. (Circular Técnica, n. 163).

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

SILVA, J. C. Eucalipto – A madeira do futuro. **Revista da Madeira**. Curitiba, PR. 114 p. set. 2001. Edição nº 59.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, mar. 1997.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, p. 32, n. 2, p. 213-20, fev. 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 113-117, jan./jun. 1997.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p.391-399, mai./jun., 2006.

SILVA 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.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Edusp / ABRH, 1997, 35-51p.

STAPE, J. L. A pesquisa silvicultural e a visão socioambiental são imprescindíveis para os novos clusters florestais. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto. dez-07/fev-08, p. 37, 2008.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

STRECK et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER / RS, UFRGS, 2002. 107 p.

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

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

USDA. **Soil Taxonomy - A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. 2 nd. Handbook. Washington D. C.: U. S. Government Printing Office. 1999.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, maio. 1980.

VIEIRA, D. B. Relação água, solo e planta. In: **Programa Nacional de Irrigação: Curso de elaboração de projetos de irrigação**. Brasília. 1986.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill. 1975. 245 p.

VOGELMANN, E. S. et al. Comportamento da condutividade hidráulica saturada em perfis de uma topossequência em função da orientação. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Fortaleza. 2009.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren.** 2005. 107 p. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel. 2005.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society American Journal**, v.56, n.6, p.1743-1750, 1992.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of Soil Physics.** New York: Academic, p.319–344, 1980.

WHITEHEAD, D.; BREADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: A review. **Forest Ecology and Management**, Victoria, v. 193, n. 1-2, p. 113-140, may. 2004.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. Implantados em campo nativo.** 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.