

A funcionalidade do sistema poroso do solo
em floresta de eucalipto sob ArgissoloThe functionality of soil porous system in
eucalyptus forestry on a HapludalfJuliana Prevedello¹, Eduardo Saldanha Vogelmann²,
Douglas Rodrigo Kaiser³ e Dalvan José Reinert⁴**Resumo**

A funcionalidade do sistema poroso do solo pode ser avaliada através de seus volumes ou pela forma como os poros são distribuídos, além da capacidade de transmitir água ou gases. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da substituição do campo nativo pelo cultivo de eucalipto na distribuição do diâmetro de poros, na permeabilidade do solo ao ar e na condutividade hidráulica saturada em Argissolo, em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Coletaram-se amostras deformadas e indeformadas em diferentes camadas de solo para a caracterização física e a distribuição dos tamanhos de poros. Eventuais modificações na distribuição do sistema poroso oriundas do preparo do solo para a implantação da floresta de eucalipto não são mais perceptíveis após três anos do cultivo do eucalipto em substituição ao campo nativo, evidenciando o efeito resiliente da floresta, o qual auxilia o solo na recuperação e manutenção da funcionalidade do sistema poroso. A distribuição do diâmetro de poros explica a variação da condutividade hidráulica do solo saturado e da permeabilidade do solo ao ar, sendo essas propriedades dependentes principalmente das maiores classes de diâmetros de poros (>300µm).

Palavras-chave: Condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade do solo ao ar, correlação, campo nativo, *Eucalyptus grandis*.

Abstract

The function of the pore system in the soil can be assessed by its volume or the way the pores are distributed, and this determines the capacity to transmit water or gas. This study aimed to evaluate the effect of replacing native grassland with eucalyptus in the distribution of pore diameter, permeability of soil to air and saturated hydraulic conductivity in a Hapludalf, in Santa Maria, Rio Grande do Sul State. Undisturbed samples were collected in different soil layers for physical characterization and distribution of pore sizes. Possible changes in the distribution of the pore system derived from soil tillage for the implantation of Eucalyptus forests are no longer perceptible after three years of cultivation of eucalyptus in replacement of the native grassland. This shows the resilience of the forest, which helps the soil to recover in maintaining the functionality of the pore system. The pore diameter distribution explains the variation in the saturated hydraulic conductivity and permeability of the soil to air. These properties are mainly dependent of the major classes of pore diameters (> 300µm).

Keywords: Hydraulic conductivity of saturated soil, soil permeability to air, correlation, native grassland, *Eucalyptus grandis*.

INTRODUÇÃO

A porosidade pode ser definida como sendo o total de vazios do solo (KIEHL, 1979) de diferentes tamanhos e formas, determinados pelo arranjo das partículas sólidas, constituindo a fra-

ção volumétrica do solo ocupada com ar e solução (água e nutrientes) (MESQUITA; MORAES, 2004). O bom desenvolvimento das plantas depende de uma rede contínua de poros com ampla variação de diâmetros, que proporcione boa infiltração, drenagem, aeração e manutenção de

¹Engenheira Florestal. Pós-Doutoranda em Engenharia Florestal. UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Av. Roraima, 1000 - 97105-900, Santa Maria - RS. E-mail: juliprevedello@gmail.com.

²Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Ciência do Solo. UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Av. Roraima, 1000 - 97105-900, Santa Maria - RS. E-mail: eduardovogelmann@hotmail.com.

³Engenheiro Agrônomo, Professor Adjunto. UFFS - Universidade Federal da Fronteira Sul. Rua Major Antônio Cardoso, 590 - 97900-000, Cerro Largo, RS. E-mail: douglasrodrigokaiser@gmail.com

⁴Engenheiro Agrônomo, Professor Titular. UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Av. Roraima, 1000 - 97105-900, Santa Maria, RS. E-mail: dalvanreinert@gmail.com

adequado teor de água, facilitando, assim, a penetração das raízes e as trocas gasosas com a atmosfera (REICHERT et al., 2009), bem como a absorção de água e nutrientes (TOGNON, 1991).

A qualidade do sistema poroso do solo pode ser avaliada através do seu volume ou pela forma como os poros são distribuídos, além da capacidade que possuem de transmitir água ou gases (DORNER; HORN, 2009). Nesse sentido, a distribuição do diâmetro dos poros determina o potencial com que a água é retida pela matriz do solo e, conseqüentemente, a tensão necessária para esvaziá-los. Quanto maior o tamanho dos poros, menor será a tensão a ser aplicada para retirar a água e, quanto menor o tamanho dos poros, consideravelmente maior será a tensão necessária. Assim, Mesquita e Moraes (2004) relatam que qualquer fator que exerça influência sobre o tamanho e a configuração dos poros do solo refletirá na aeração, na retenção e na condutividade hidráulica, uma vez que os macroporos são responsáveis pela infiltração e drenagem e os microporos pela retenção da água no solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) determina a habilidade do solo em conduzir água (KLUTE; DIRKSEN, 1986) e é avaliada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água (HILLEL, 1998). Nesse propósito, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) tem sido amplamente utilizada em pesquisas, sendo um dos principais atributos considerados na avaliação das características físicas do solo, por controlar diretamente a infiltração e a redistribuição da água no perfil do solo (BAVER et al., 1972; HILLEL, 1998). Isto porque a K_s e a macroporosidade do solo estão intimamente relacionadas, uma vez que 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, de um modo geral, os maiores valores de K_s estão relacionados com os maiores valores de macroporosidade (MESQUITA; MORAES, 2004), porém o fluxo está mais intimamente ligado à continuidade dos poros do que com 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. Nesse sentido, verifica-se que a K_s é mais dependente da estrutura do que da textura, considerando-se que a mesma depende, entre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros preenchidos com água

(BOUMA, 1982; MESQUITA; MORAES, 2004) e, portanto, está sujeita às alterações estruturais promovidas pelos diferentes usos do solo.

A remoção da vegetação natural geralmente causa grandes alterações edáficas, mas, em longo prazo, o que irá determinar as condições físicas, químicas e biológicas do solo serão a forma e o grau de perturbação antrópica (GONÇALVES, 2002). O tráfego de máquinas agrícolas ou florestais, por exemplo, promove pressão na superfície do solo o que resulta na aproximação e rearranjo das partículas sólidas, aumentando a densidade com redução do espaço poroso do solo. Esse processo altera parâmetros físicos responsáveis pelo desenvolvimento das plantas, tais como a resistência que o solo oferece ao enraizamento, infiltração e condução de água, além da diminuição da difusão de gases no solo (REICHERT et al., 2009). Em estudo envolvendo a implantação de *E. grandis*, Melloni et al. (2008) 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 infiltração e armazenamento de água e na aeração do solo, características fundamentais para promover o suprimento de ar e água ao sistema radicular das culturas.

O eucalipto é uma das espécies florestais mais cultivadas no Brasil para o suprimento de matéria-prima às cadeias produtivas de importantes segmentos industriais, sobretudo para o processo produtivo de celulose e papel. Em 2011, a área ocupada por plantios florestais no Brasil totalizou 6.515.844 ha, sendo 74,8% dessa área com plantios de *Eucalyptus* spp. e 25,2% com plantios de *Pinus* spp. (ABRAF, 2012). Em decorrência da potencialidade de expansão do setor florestal e buscando regiões pioneiras para o florestamento, a Metade Sul do Rio Grande do Sul, que corresponde ao Bioma Pampa e compreende 61% da área territorial do estado, passou a ser alvo de especulações em relação ao cultivo do eucalipto. Entretanto, possui limitações de ordem climática (baixa pluviosidade) ou edáfica, devido à ocorrência de solos arenosos com baixa capacidade de retenção e armazenamento de água, além da grande fragilidade natural dos mesmos, tornando-os mais susceptíveis ao processo erosivo.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da substituição do campo nativo pelo eucalipto, na distribuição dos

diâmetros de poros, na permeabilidade do solo ao ar e na condutividade hidráulica do solo saturada em um Argissolo, na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em um povoamento de *Eucalyptus grandis* plantado sobre uma área de campo nativo pertencente à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - FEPAGRO Florestas, no município de Santa Maria, RS. O estudo foi realizado em solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2006). A análise granulométrica do solo indicou teor médio de 630g kg⁻¹ de areia, 170g kg⁻¹ de silte e 200g kg⁻¹ de argila até a profundidade de 0,80m, enquadrando-se na classe textural franco-arenosa. O horizonte Bt tem teores médios de 500g kg⁻¹ de areia, 160g kg⁻¹ de silte e 340g kg⁻¹ de argila.

Os tratamentos avaliados foram diferentes usos do solo: *E. grandis* com 3 anos de idade (eucalipto) comparado ao campo nativo com vegetação predominante de gramíneas (CN). O povoamento de eucalipto foi implantado em novembro de 2006. Antes do 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 0,20m. As mudas de *E. grandis* foram plantadas num espaçamento de 3,0x2,0m (PREVEDELLO et al., 2013). O tratamento campo nativo encontra-se estabelecido há mais de duas décadas (ABRÃO et al., 1988; SOARES, 2011), recebendo apenas uma intervenção anual por roçada mecânica. Conforme descrição e caracterização realizada da vegetação, foram identificadas como espécies predominantes a *Solanum mauritianum* (fumo-bravo), *Paspalum notatum* Fluegge (Gramma forquilha), *Andropogon lateralis* (Capim caninha), *Axonopus pressus* (Gramma missioneira) e *Aristida pallens* Cav. (barba-de-bode).

Para caracterizar o solo nos diferentes usos, amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos de aproximadamente 0,057m de diâmetro e 0,04m de altura, 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 0,50m, com três repetições (na linha de plantio do eucalipto). No laboratório, as amostras foram saturadas, pesadas e submetidas às tensões de -1, -6 e -10kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006)

para determinar a macroporosidade, a microporosidade e a umidade na capacidade de campo, respectivamente. Em seguida, as amostras foram submetidas às tensões de -33 e -100kPa em Câmara de Richards (KLUTE; DIRKSEN, 1986). Em cada tensão equilibrada, mediu-se o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeâmetro de carga constante, para posterior cálculo da permeabilidade do solo ao ar (Kar). A metodologia e o equipamento foram adaptados de Horn et al. (2004). Posteriormente, as amostras foram novamente saturadas para medida do fluxo de água e determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) em permeâmetro de carga variável, conforme procedimento descrito por Hartge e Horn (1992). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105° C até peso constante para calcular a densidade do solo. A distribuição do diâmetro de poros foi obtida a partir das curvas de retenção de água no solo, pela equação fundamental da capilaridade, conforme Fernandes et al. (1983).

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. Os dados da área de *E. grandis* (eucalipto) foram comparados com os dados da área de campo nativo (CN) e submetidos à análise de variância. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste "t" pareado de Student, a 5% de probabilidade de erro. A existência de inter-relações entre as propriedades físicas foram realizadas pela análise de correlação de Pearson, empregando-se o coeficiente de correlação com nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo apresentou-se menor na camada superficial (0,00 - 0,10m) em ambas as áreas (Tabela 1), semelhante ao encontrado por Rigatto et al. (2005), que relatam que a manutenção e incorporação da matéria orgânica sempre maior na superfície, favorece a agregação e a melhoria da estrutura, resultando em redução da densidade do solo. Nas camadas superficiais acumulam-se a maior quantidade de resíduos orgânicos e raízes de plantas, que após sofrerem o processo de decomposição pela fauna microbiológica do solo, resultam em altos teores de matéria orgânica incorporada ao solo, concordando com Soares (2011), que encontrou

13,4% de matéria orgânica no eucalipto e 11,2% no CN, no horizonte superficial da mesma área de estudo em Santa Maria. Além disso, a ação do crescimento radicular das plantas rompe camadas compactadas e adensadas, reduzindo a densidade e aumentando a porosidade total do solo (PREVEDELLO et al., 2013; VOGELMANN et al., 2012). Observa-se aumento dos valores de densidade em ambos os tratamentos com o aumento da profundidade do solo, o que pode ser atribuído a menor presença de matéria orgânica, ao aumento nos teores de argila (REICHERT et al., 2007) e ao adensamento natural do solo

proporcionado pelas camadas sobrejacentes (KIEHL, 1979; CAVENAGE et al., 1999; PREVEDELLO et al., 2013), uma vez que na área não houve atividade antrópica capaz de provocar a compactação do solo subsuperficialmente.

Aliado aos menores valores de densidade do solo observou-se os maiores valores de porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 1). De maneira geral, quanto menor a densidade global e a resistência à penetração de raízes, maior será a porosidade total, macroporosidade e disponibilidade de água e, conseqüentemente, maiores

Tabela 1. 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.

Table 1. Soil density (Ds), macroporosity (Mac); microporosity (Mic); total porosity (Pt) and saturated hydraulic conductivity (Ks) for the areas and layers of soil evaluated.

Área	Ds	Mac	Mic	Pt	Ksat
	-----Mg m ⁻³ -----	-----m ³ m ⁻³ -----	-----m ³ m ⁻³ -----	-----mm h ⁻¹ -----	-----mm h ⁻¹ -----
Camada de 0,00 - 0,10 m					
CN	1,35a	0,20a	0,29a	0,48a	211a
Eucalipto	1,33a	0,22a	0,23a	0,45a	207a
c.v. (%)	6	22	17	5	45
Camada de 0,10 - 0,20 m					
CN	1,50b	0,14a	0,27a	0,41a	52b
Eucalipto	1,56a	0,13a	0,28a	0,41a	79a
c.v. (%)	3	7	3	2	42
Camada de 0,20 - 0,30 m					
CN	1,48a	0,10a	0,29a	0,39a	34b
Eucalipto	1,58a	0,13a	0,27a	0,40a	86a
c.v. (%)	4	20	3	7	48
Camada de 0,30 - 0,40 m					
CN	1,57a	0,08a	0,27a	0,35a	38b
Eucalipto	1,59a	0,10a	0,27a	0,37a	76a
c.v. (%)	3	20	5	4	88
Camada de 0,40 - 0,50 m					
CN	1,54b	0,07b	0,28a	0,35a	26b
Eucalipto	1,62a	0,11a	0,27a	0,38b	53a
c.v. (%)	3	21	6	7	101

CN = Campo nativo. c.v. = coeficiente de variação em porcentagem. * Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 2. Correlação de Pearson entre as propriedades físico-hídricas e as classes de diâmetro de poros nas áreas analisadas.

Table 2. Pearson's correlation between the physical and hydraulic properties, and pore diameter classes in the areas analyzed.

	Ds	Mac	Mic	Pt
Dp > 300 µm	-0,35****	0,63****	-0,27***	0,39****
Dp 300 - 50 µm	-0,53****	0,88****	-0,37****	0,57****
Dp 50 - 30 µm	-0,19*	0,34***	-0,16 ^{ns}	0,20*
Dp 30 - 9 µm	0,34****	-0,24**	0,08 ^{ns}	-0,17*
Dp 9 - 3 µm	0,02 ^{ns}	-0,02**	-0,05 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
Dp < 3 µm	-0,08 ^{ns}	-0,37****	0,96****	0,42****
Ds	1	-0,59****	-0,02 ^{ns}	-0,61****
Mac	-	1	-0,40****	0,66****
Mic	-	-	1	0,42****
Pt	-	-	-	1

**** $p < 0,0001$; *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ^{ns} = não significativo. Dp = diâmetro de poros; Ds = densidade do solo; Mac = macroporos; Mic = microporos; Pt = porosidade total.

são as taxas de crescimento dos sítios florestais (BRADY, 1996). Gonçalves (2002) relata que qualquer ação que provoque enfraquecimento na estrutura do solo, como os ciclos de umedecimento e secagem, o crescimento das raízes das plantas e a atividade da fauna edáfica, intensificam o processo de agregação, favorecendo o aumento da porosidade. Além disso, a forma como as partículas sólidas se arranjam resultam na distribuição do sistema poroso, dessa forma, se elas se arranjam em íntimo contato, predomina a presença de sólidos e a porosidade será baixa, no entanto, se as partículas se encontram arranjadas em agregados, ocorre predominância de vazios no solo e a porosidade será alta (RIBEIRO et al., 2007).

A presença de macroporos favorece a ocorrência de fluxo de água em solo saturado, uma vez que esse processo ocorre preferencialmente nos poros de maior diâmetro (MESQUITA; MORAES, 2004), sendo assim, comum ocorrer correlação entre essas variáveis (Tabela 2). Além disso, a presença de "megaporos" é mais comum nas camadas superficiais e seus efeitos podem não influenciar de forma decisiva os resultados de macroporosidade; contudo, afetarão os valores de condutividade, visto que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (lei de Poiseuille) e, por essas razões, é comum obter valores altos de K_s nesta camada (REICHERT et al., 2007). Assim, a K_s apresentou-se numericamente elevada na camada superficial onde se observou maiores valores de P_t , Macro e menor D_s (Tabela 1), comprovado pela alta correlação em entre essas propriedades físicas na tabela 2, corroborando com o descrito por Camargo e Alleoni (1997) e Ribeiro et al. (2007).

A introdução do eucalipto em áreas nativas de campo não afetou negativamente a estrutura do solo, visto que os valores de K_s na camada superficial, para ambas as áreas, foram elevados e não se diferenciaram estatisticamente (Tabela 1). Esses resultados refletem o efeito benéfico da cobertura florestal nesse atributo, além disso, o longo período de rotação sem interferência de manejo na área é capaz de recuperar e manter o espaço poroso que antes havia sido modificado nas operações de implantação (PREVEDELLO et al., 2013) e, dessa maneira, proporcionar aumentos da K_s . A brusca redução da K_s com o aumento da profundidade do solo esteve acompanhada de diferenciação estatística entre a área com eucalipto e a área de campo, sendo os maiores va-

lores absolutos de K_s para o eucalipto. A redução da K_s no perfil do solo pode ser justificada pela redução da porosidade total, macroporosidade e microporosidade, bem como, pelo aumento proporcional da densidade, propriedades estas, que se encontram altamente correlacionados com a K_s (Tabela 2). Conforme relatam Reichert et al. (2007), essas alterações contribuem para o decréscimo do diâmetro dos poros, reduzindo, assim, o fluxo de água ao longo do perfil. Comportamento análogo era esperado para a permeabilidade ao ar (K_a), contudo não se observou grande variação numérica dessa propriedade entre as áreas e camadas avaliadas (Tabela 3).

O aumento sucessivo do potencial de água aplicado nas amostras de solo promove a drenagem da água contida principalmente nos macroporos, que passam a ser um importante canal condutor de ar, devendo haver um aumento da K_a com a redução da K_s (Tabela 3). Entretanto, essa tendência não foi verificada nos tratamentos e nas camadas de solo avaliadas, sendo que, em alguns casos foi observada à redução da K_a com o aumento do potencial de água no solo, situação semelhante à observada por Corcini (2008), justificando à obstrução de poros por partículas carregadas pela água drenada, que acabam interrompendo a passagem do ar.

Alguns estudos têm definido a condutividade hidráulica e a permeabilidade ao ar como dependente da estrutura do solo (RIBEIRO et al., 2007; SILVA et al., 2009), influenciada pela distribuição e geometria do sistema poroso, tortuosidade e conectividade (DORNER; HORN, 2009). Além disso, a K_a é condicionada principalmente pelo tamanho e continuidade dos macroporos, características consideradas mais importantes do que a quantidade de poros na determinação do fluxo de ar (BALL et al., 1988). Dessa forma, uma análise minuciosa da distribuição do diâmetro de poros facilita o entendimento da funcionalidade da estrutura porosa do solo, não ficando restrita somente aos valores da porosidade total, aperfeiçoando o entendimento dos processos de circulação e armazenamento de água e gases (RIBEIRO et al., 2007; REICHERT et al., 2011), do fluxo e retenção de calor (VOMOCIL; FLOCKER, 1966) e até permitindo inferir sobre o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (GONÇALVES, 2002).

A distribuição do diâmetro de poros foi muito semelhante entre as duas áreas e camadas estudadas (Figura 1). Assim, conforme comentado anteriormente, a macroporosidade em

ambas as áreas, que compreende as classes de poros >50 μm foi maior na camada superficial (Tabela 1), sendo representado na sua maioria pelos poros de diâmetro compreendidos entre 300-500 μm . Entretanto, o volume de poros de diâmetro >300 μm foi semelhante para todas as camadas. Esse resultado permite concluir que a substituição do campo nativo pelo cultivo de eucalipto não alterou a distribuição do sistema poroso do solo, refletindo o efeito benéfico da cobertura florestal. O longo período sem interferência de práticas de manejo na área é capaz de recuperar e manter o espaço poroso do solo, que eventualmente poderia ser modificado nas operações de implantação da floresta.

A Ks e a Kar no potencial de -100 kPa apresentaram correlação negativa com elevado nível de significância ($p < 0,0001$) entre si e, positiva,

com a classe de diâmetro de poros >300 μm (Tabela 4). Isso comprova que a Ks e a Kar são dependentes das maiores classes de diâmetros de poros, uma vez que a correlação com as classes de poros de diâmetros menores foram raras ou com baixos níveis de significância. Isso está atrelado ao fato de que, à medida que o solo seca a água será drenada primeiramente nos poros maiores, passando a contribuir para o fluxo de ar, enquanto a maioria dos microporos encontra-se ainda preenchida por água. Ball e Schjonning (2002) descrevem que a Kar possui relação inversa com o conteúdo de água e com a condutividade hidráulica, 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, onde nesta, a Ks será máxima.

Tabela 3. Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) em amostras equilibradas em diferentes potenciais (Ψ) para as áreas e camadas de solo avaliadas.

Table 3. Soil permeability to air (μm^2) in balanced samples at different potentials (Ψ) for the areas and layers of soil evaluated.

Área	Ψ - 6	Ψ -10	Ψ -33	Ψ -100
Camada de 0,00 – 0,10 m				
CN	2,62a	3,27a	4,27a	2,91a
eucalipto	2,56a	3,14a	4,04a	4,06a
c.v. (%)	37	47	57	44
Camada de 0,10 – 0,20 m				
CN	1,57a	1,56a	1,71a	1,90a
eucalipto	2,38a	2,06a	1,96a	1,92a
c.v. (%)	10	21	38	23
Camada de 0,20 – 0,30 m				
CN	2,47a	2,69a	3,20a	3,20a
eucalipto	2,14a	1,94a	1,94a	1,89a
c.v. (%)	30	36	42	29
Camada de 0,30 – 0,40 m				
CN	2,78a	2,18a	1,80a	1,77a
eucalipto	1,83a	1,67a	1,69a	1,79a
c.v. (%)	32	27	21	24
Camada de 0,40 – 0,50 m				
CN	1,84a	1,83a	2,02a	1,79a
eucalipto	2,56a	2,07a	1,79a	2,62a
c.v. (%)	16	29	46	57

CN = Campo nativo. c.v.= coeficiente de variação em porcentagem. * Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na linha, diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 4. Correlação de Pearson entre a permeabilidade ao ar (Kar) e condutividade hidráulica saturada (Ks) em diferentes potenciais e as diferentes classes de diâmetros de poros do solo.

Table 4. Pearson's correlation between air permeability (Kar); saturated hydraulic conductivity (Ks) at different potentials; and different classes of soil pore diameters.

	Ks	Classes de diâmetro de poros (μm)					
		> 300	300 a 50	50 a 30	30 a 9	9 a 3	< 3
Kar _{Ψ -6 kPa}	ns	0,48***	ns	ns	ns	ns	ns
Kar _{Ψ -10kPa}	ns	0,47***	0,20*	ns	ns	ns	ns
Kar _{Ψ -33 kPa}	-0,18*	0,45***	0,23*	ns	ns	ns	ns
Kar _{Ψ -100kPa}	-0,34***	0,33***	0,24**	0,19*	ns	ns	ns
Ks	1	0,33***	0,56***	0,58***	ns	ns	ns

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns = não significativo.

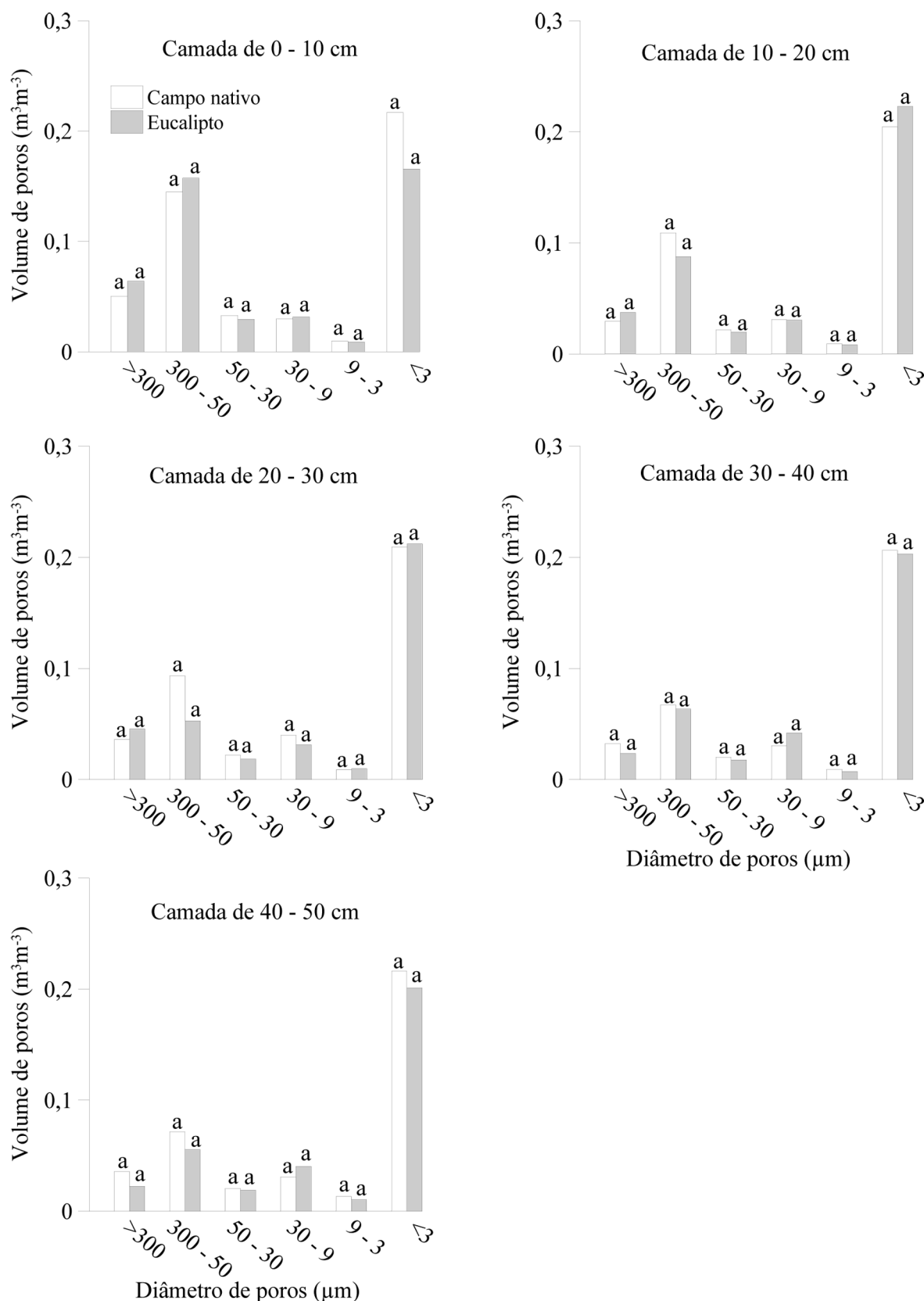


Figura 1. Distribution of pore diameter in the two study areas and in the evaluated layers.
Figure 1. Distribution of pore diameter in two areas of study and evaluated in the layers.

Poros com diâmetro $>50\mu\text{m}$ apresentaram correlação inversa com a D_s (Tabela 2), permitindo inferir que um aumento da densidade do solo reflita negativamente na K_{ar} e K_s , reduzindo

o fluxo de água e ar no solo, com consequente impacto negativo no crescimento das plantas. Isso é ratificado por Vogelmann et al. (2012), que verificaram que o aumento da densidade

promove uma alteração na estrutura porosa, reduzindo os poros maiores e aumentando os menores, com reflexos diretos na condutividade hidráulica do solo. Ball e Schjonning et al. (2002) também relatam que a permeabilidade do solo ao ar é exponencialmente relacionada com a macroporosidade, além de ser dependente da densidade e do teor de água do solo.

Em relação aos microporos, poros de diâmetro $<50\mu\text{m}$ e que perdem água em potenciais entre -6 e -1500kPa , não foi observada correlação com a Kar ou Ks. Assim, se o solo apresentar elevado percentual de microporos na composição da sua porosidade total, provavelmente ele terá baixa Ks e menor eficiência em conduzir água que em solos com maior número de macroporos; ou baixa Kar por esses poros serem os responsáveis por reter água em potenciais matriciais mais elevados e apresentarem-se preenchidos por água em potenciais nos quais os

poros maiores ($>50\mu\text{m}$) já se esvaziaram e estão contribuindo efetivamente com a Kar. Daí a importância de se analisar a porosidade total em conjunto com a composição de macro e microporos, a fim de dar prioridade às práticas de manejo que visem manter o balanço entre as classes de poros, buscando efetivamente elevar a Ks e a Kar sem prejudicar a retenção e a disponibilidade de água e o fluxo de ar no solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas.

A Kar nos potenciais de -10 , -33 e -100kPa apresentou analogamente correlação com as maiores classes de diâmetro de poros (>300 e $300-50\mu\text{m}$), sendo mais expressiva sua relação com a classe de poros $>300\mu\text{m}$, confirmado pelo maior coeficiente angular das equações lineares ajustadas aos dados. Dessa forma, um aumento na quantidade de poros de diâmetro $>300\mu\text{m}$ resulta em aumento da Kar em quaisquer dos potenciais avaliados (Figura 2).

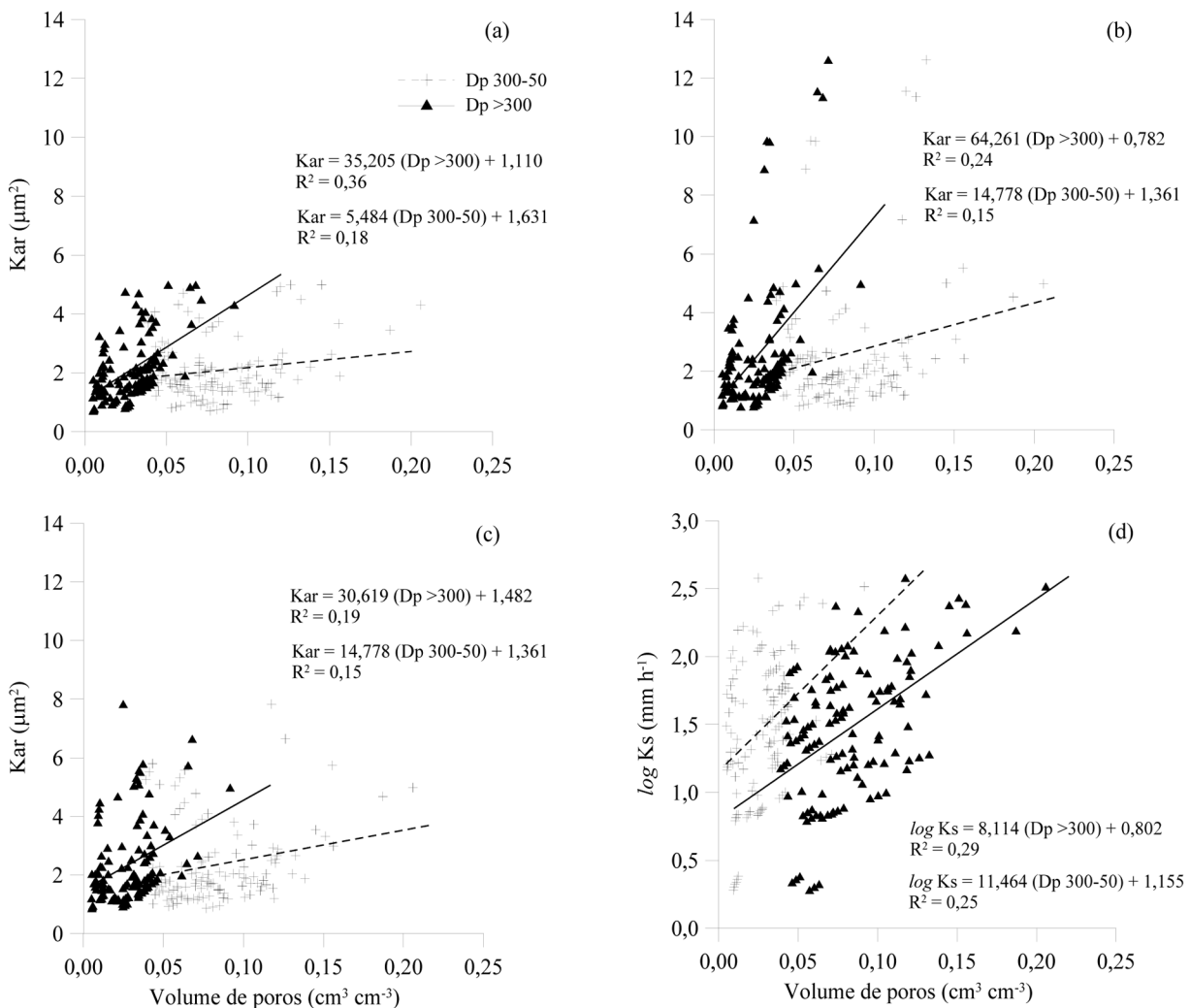


Figura 2. Relação das classes de diâmetro de poros (Dp) $>300\mu\text{m}$ e de $50 - 300\mu\text{m}$ com a permeabilidade ao ar equilibrada nos potenciais de -10kPa (a), -33kPa (b), -100kPa (c) e com a condutividade hidráulica do solo saturado ($\log Ks$) (d).

Figure 2. Relationship of pore diameter classes (Dp) > 50 and $300\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$ with air permeability balanced to the potentials of -10kPa (a); -33kPa (b); and -100kPa (c), and with saturated hydraulic conductivity ($\log Ks$) (d).

O comportamento da Ks mostrou-se semelhante em relação às maiores classes de diâmetro de poros. A partir disso, é possível afirmar que para ambas as propriedades, Kar e Ks, as classes de maiores diâmetros de poros influenciam diretamente em sua magnitude e, portanto, quaisquer práticas de manejo que promovam alterações nessas classes de poros irão repercutir diretamente nos fluxos de ar e água do solo.

CONCLUSÕES

Eventuais modificações na distribuição do sistema poroso oriundas do preparo do solo para a implantação da floresta de eucalipto não são mais perceptíveis após três anos do cultivo do eucalipto em substituição ao campo nativo, evidenciando o efeito resiliente da floresta, o qual auxilia o solo na recuperação e manutenção da funcionalidade do sistema poroso.

A distribuição do diâmetro de poros explica a variação da condutividade hidráulica do solo saturado e da permeabilidade do solo ao ar, sendo essas propriedades dependentes principalmente das maiores classes de diâmetros de poros (>300µm).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. *Anuário estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011*. Brasília, 2012. 150p.
- ABRÃO, P. U. R.; GIANLUPPI, D.; AZOLIN, M. A. D. *Levantamento semidetalhado dos solos da estação experimental de silvicultura de Santa Maria*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas de Recursos Naturais Renováveis, 1988. 75 p.
- BALL, B. C.; SCHJONNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). *Methods of soil analysis*, 5.ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. cap. 4, p. 1141-1158.
- BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 39, n. 3, p. 327-339, 1988.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil structure: evaluation and agricultural significance. In: BAVAR, L. D. et al. *Soil physics*. 4.ed. New York: John Wiley, 1972. p. 178-223.
- BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 46, n. 2, p. 438-441, 1982.
- BRADY, N. C. *The nature and properties of soils*. 11. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 255 p.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. *Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas*. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.
- CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C. A.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.
- CORCINI, A. L. M. *Variação temporal da estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai*. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, Oxford, v. 102, n. 2, p. 225-232. 2009.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa Solos. 2006. 306 p.
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (TypicArgiaquoll e TypicHapludalf). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 7, n. 3, p. 329-333, 1983.
- GONÇALVES, J. L. M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 1-46.
- HARTGE, K. H.; HORN, R. *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Stuttgart: Ed. Ferdinand Enke Verlag. 1992. 177 p.
- HILLEL, D. *Environmental soil physics*. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

- HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, Oxford, v. 79, p. 207-219. 2004.
- KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A., (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Cap. 1, p. 687-732.
- MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N. A.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em argissolo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2013.
- REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A. et al. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, Oxford, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: KLABUBERG FILHO, O. et al. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011, v. 7, p. 1-54.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1930-1935, 2006.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F. e SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709. 2005.
- SILVA, A.P. 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.
- SOARES, J. C. W. S. **Matéria orgânica de um Argissolo Vermelho distrófico úmbrico após a introdução de fitofisionomias antrópicas**. 2011. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guaíra-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- VOGELMANN, E. S.; REICHERT, J. M.; PREVEDELLO, J.; BARROS, C. A. P.; QUADROS, F. L. F.; MATAIX-SOLERA, J. Soil hydro-physical changes in natural grassland of southern Brazil subjected to burning management. *Soil Research*, Melbourne, v. 50, n. 6, p. 465, 2012.
- VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, 1966.

Recebido em 24/06/2013

Aceito para publicação em 14/11/2013