

PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE AO AR EM TOPOSSEQUÊNCIA ARGISSOLO-GLEISSOLO: VARIAÇÃO NO PERFIL E EFEITO DE COMPRESSÃO

Fabiano de Vargas Arigony Braga^{(1)*}, José Miguel Reichert⁽²⁾, Marcelo Ivan Mentges⁽²⁾,
Eduardo Saldanha Vogelmann⁽²⁾ e Richard Alberto Rodríguez Padrón⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Agrícola, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Solos, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

*Autor correspondente.

E-mail: fabianovab@gmail.com

RESUMO

Uma topossequência apresenta solos com características estruturais e morfológicas distintas que podem alterar a susceptibilidade à deformação estrutural em curtas distâncias espaciais. Os objetivos deste estudo foram avaliar a capacidade de suporte de carga e a susceptibilidade à compactação e mensurar o efeito que cargas acima e abaixo da pressão de preconsolidação causam na permeabilidade ao ar de solos numa topossequência da Depressão Central do Rio Grande do Sul, Brasil. Amostras indeformadas foram coletadas nos horizontes de três perfis de Argissolos (Ap, A1, AB, BA, Bt1 e Bt2; Ap, A1, A2, AB, BA, Bt1 e Bt2; e Ap, A1, BA, Bt1 e Bt2) e dois de Gleissolos (A1, A2, Bg; A, Bg e Cg), no longo de uma topossequência. Essas amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, sendo avaliada a permeabilidade ao ar antes e após compressão. Na condição de capacidade de campo, os Gleissolos apresentaram menor susceptibilidade à compactação e maior capacidade de suporte de carga que os Argissolos. O teor de argila esteve diretamente correlacionado com a capacidade de suporte de carga. Portanto, foi inversamente proporcional à susceptibilidade à compactação, exceto em condições de elevada umidade do solo quando a água lubrificou as superfícies aumentando a susceptibilidade à compactação de quaisquer solos. Até 25 kPa de carga ao solo não resultou degradação física do solo, mas quando foram aplicadas cargas de 200 kPa, mesmo na condição de capacidade de campo, houve redução

Recebido para publicação em 11 de novembro de 2014 e aprovado em 17 de abril de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140724

significativa do volume de macroporos e porosidade total em níveis inferiores ao limite crítico ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Palavras-chave: propriedades físicas, compressibilidade, fluxo de ar, porosidade, umidade do solo.

ABSTRACT: SOIL MECHANICAL PROPERTIES AND PERMEABILITY TO AIR IN AN ALFISOL-AQUALF TOPOSEQUENCE: CHANGES IN SOIL PROFILE AND THE EFFECT OF COMPRESSION

A toposequence has soils with distinct structural and morphological properties that may affect soil susceptibility to structural deformation in short spatial distances. The objective of this study was to evaluate soil load-bearing capacity and susceptibility to compaction, and quantify the effects that loads above and below preconsolidation pressure cause on soil permeability to air in a toposequence of the Central Lowlands of Rio Grande do Sul, Brazil. Undisturbed soil samples were collected from horizons of soil profiles of three Alfisols (Ap, A1, AB, BA, Bt1, Bt2; Ap, A1, A2, AB, BA, Bt1, Bt2; Ap, A1, BA, Bt1, Bt2) and two Aqualfs (A1, A2, Bg; A, Bg, Cg) along a toposequence. These samples underwent the uniaxial compression test, and soil permeability to air was tested before and after quantification of compression. Under the condition of field capacity, Aqualfs are less susceptible to compaction and have higher load-bearing capacity (higher preconsolidation pressure) than Alfisols. Soil clay content is directly correlated with the load-bearing capacity of the soil. Therefore, it is inversely proportional to susceptibility to compaction, except under high soil moisture conditions, when water lubricates the surfaces, increasing susceptibility to compaction of any soil. Loads up to 25 kPa do not result in physical degradation of the soil, but when a 200-kPa load is applied, even under the condition of field capacity, there is a significant reduction in macroporosity and total porosity, arriving at levels lower than the threshold level ($0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Keywords: physical properties, compressibility, air flow, porosity, soil moisture.

INTRODUÇÃO

O relevo é um dos principais fatores responsáveis pela formação dos solos por direcionar os fluxos de água e o transporte de material particulado e dissolvido (Jenny, 1941). A região da Depressão Central do Rio Grande do Sul, Brasil, corresponde à borda da bacia sedimentar do Paraná e apresenta relevo composto por campos irregulares com declives médios e grandes planícies aluviais, conhecidos regionalmente como “coxilhas”. Argissolos, Planossolos e Gleissolos formam topossequências características na região.

Como cada compartimento da topossequência apresenta propriedades únicas, os solos tendem a apresentar um comportamento distinto em relação ao uso agrícola, principalmente por causa das propriedades físicas, hídricas e mecânicas, que são influenciadas pelo uso e manejo do solo e estão diretamente relacionadas com o crescimento das plantas. Práticas de manejo motomecanizadas podem exercer pressões acima da pressão de preconsolidação, promovendo a compactação do solo (Gubiani et al., 2013a).

O processo de compactação pode ser retratado a partir da curva de compressão do solo, que representa graficamente o logaritmo da pressão externa aplicada a uma amostra, simulando a pressão exercida por um pneu agrícola com algum

parâmetro ligado à estrutura do solo, como o índice de vazios (relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos) e a densidade (Reichert et al., 2010). Dois parâmetros principais são obtidos a partir dessa curva: a pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (I_c). A σ_p representa o valor máximo que se pode aplicar ao solo sem que ocorra compactação adicional e alteração significativa da estrutura, ou seja, a deformação é basicamente elástica, enquanto o I_c refere-se à deformação basicamente plástica e representa a suscetibilidade do solo à compactação, uma vez que ultrapassa a σ_p (Holtz e Kovacs, 1981; Reichert et al., 2010).

Deformações estruturais ocorrem sempre que a pressão de preconsolidação é superada (Dias Júnior e Pierce, 1996). Essas alterações consistem no aumento da densidade, na redução do espaço aéreo, que indica quanto da porosidade do solo está ocupada, e na forma, distribuição e continuidade dos poros, reduzindo os fluxos de água e ar (Reichert et al., 2009a); Tang et al., 2011), além de elevar a resistência à penetração das raízes e reduzir o crescimento radicular das plantas, resultando na redução da produtividade das culturas (Silva et al., 2002; Gubiani et al., 2013a).

A hipótese deste estudo é: “face aos compartimentos da topossequência, os valores de σ_p e I_c variam em curto espaço, com reflexos na capacidade de suporte de cargas e na permeabilidade do solo”. Os objetivos

deste estudo foram avaliar a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação e mensurar o efeito que cargas acima e abaixo da pressão de preconsolidação causam na permeabilidade ao ar dos solos de uma topossequência da Depressão Central do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma topossequência localizada no município de Santa Maria, na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul, Brasil, com as coordenadas de 29° 44' 20" S e 53° 41' 91" O. Segundo a classificação de Köppen (Nimer, 1989), o clima é enquadrado como Cfa, com ocorrência de precipitação pluvial anual de 1.500 mm bem distribuídos ao longo de todos os meses do ano e com temperatura média anual de 19,3 °C.

Cinco perfis de solo foram estudados (Figura 1), englobando três Argissolos Vermelhos localizados no topo (PV5 - área cultivada com pastagem anual sob preparo convencional), encosta superior e

inferior (PV4 e PV3, respectivamente - pastagem perene, sem preparo) e dois Gleissolos Háplicos (GX2 e GX1, nas cotas superior e inferior, respectivamente - pastagem perene, sem preparo) (Embrapa, 2006). Os horizontes de cada perfil estão caracterizados no quadro 1. Maiores detalhes da descrição morfológica desses perfis de solo estão apresentados em Uhde (2009).

Em amostras com estrutura deformada, foram determinadas a composição granulométrica (método da pipeta) e o teor de carbono orgânico total (COT - método da combustão úmida) (Embrapa, 1997).

O comportamento compressivo do solo foi avaliado em amostras indeformadas coletadas com cilindros metálicos de 6,1 cm de diâmetro e 3 cm de altura, em cinco repetições. As amostras foram saturadas por capilaridade com o objetivo de uniformizar a condição de umidade e equilibradas a uma tensão de 10 kPa (reconhecida como estimadora da condição de Capacidade de Campo) em uma coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006; Gubiani et al., 2009). O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo a norma NBR-12007 (ABNT, 1990), com a aplicação

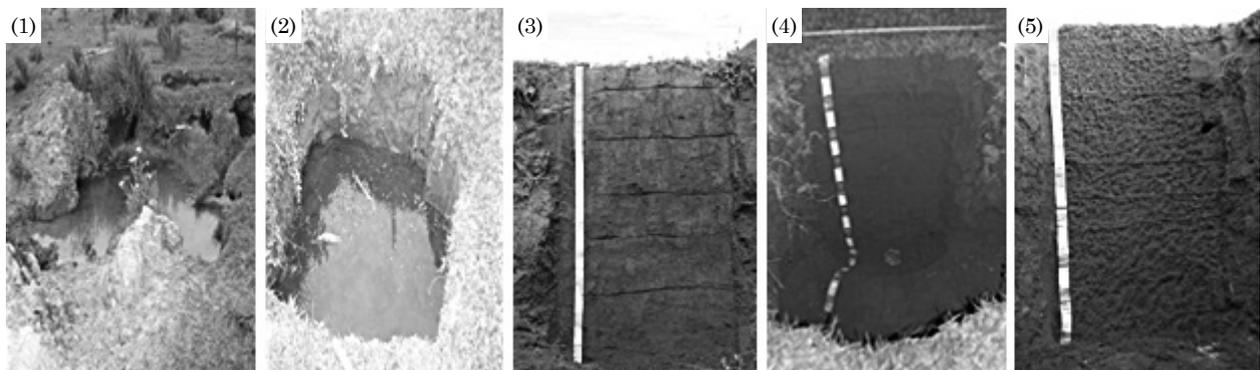
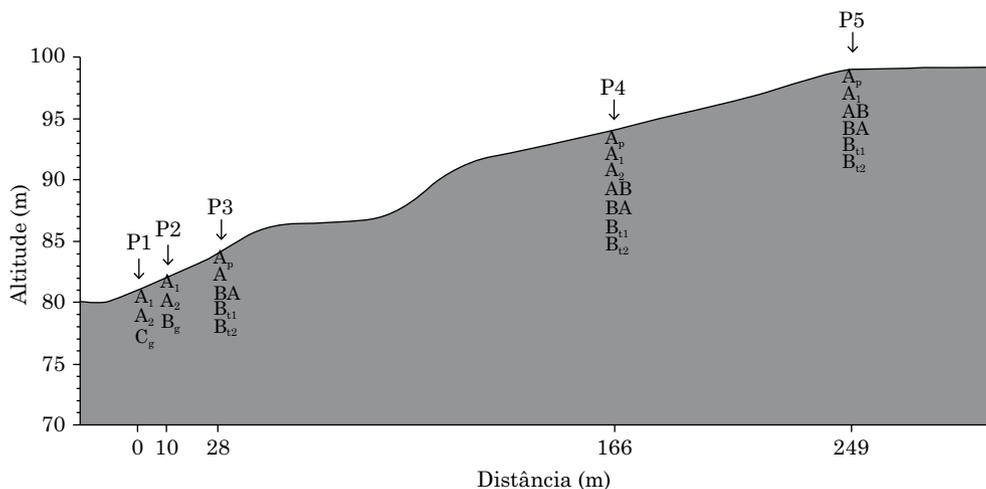


Figura 1. Gráfico e fotos da distribuição dos perfis dos Gleissolos Háplicos (Perfis 1 e 2) e dos Argissolos Vermelhos (Perfis 3, 4, e 5) ao longo da topossequência conforme distância e altitude. Fonte: Uhde (2009).

Quadro 1. Teores médios de areia, silte, argila e carbono orgânico total (COT) para os perfis dos solos da topossequência Argissolo-Gleissolo

Perfil ⁽¹⁾	Horizonte	Prof. m	Areia ⁽²⁾	g kg ⁻¹			COT
				Silte	Argila		
GX1	A	0,00 - 0,16	652	267	81	11,0	
	Bg	0,16 - 0,34	592	296	111	5,8	
	Cg	0,34+	395	490	115	6,4	
GX2	A1	0,00 - 0,22	827	101	71	6,9	
	A2	0,22 - 0,50	649	288	63	3,0	
	Bg	0,50+	689	218	94	4,7	
PV3	Ap	0,00 - 0,12	671	182	147	12,2	
	A1	0,12 - 0,47	652	179	168	10,1	
	BA	0,47 - 0,83	580	178	203	9,9	
	Bt1	0,83 - 1,23	486	247	290	4,1	
	Bt2	1,23+	462	165	373	9,5	
PV4	Ap	0,00 - 0,10	653	171	176	6,3	
	A1	0,10 - 0,40	596	200	204	2,2	
	A2	0,40 - 0,78	519	206	275	3,9	
	AB	0,78 - 0,96	394	175	432	5,9	
	BA	0,96 - 1,09	297	223	481	5,6	
	Bt1	1,09 - 1,58	336	165	499	2,6	
	Bt2	1,58+	327	198	475	1,5	
PV5	Ap	0,00 - 0,20	577	238	185	7,3	
	A1	0,20 - 0,53	533	232	235	5,8	
	AB	0,53 - 0,90	428	225	347	6,8	
	BA	0,90 - 1,17	332	281	386	4,7	
	Bt1	1,17 - 1,50	331	177	491	5,4	
	Bt2	1,50+	383	199	417	4,2	

⁽¹⁾ Gleissolos Háplicos: GX1 e GX2; Argissolos Vermelhos: PV3, PV4 e PV5. ⁽²⁾ Composição granulométrica (método da pipeta). ⁽³⁾ Método da combustão úmida (Embrapa, 1997).

de cargas estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1.600 kPa durante 5 min, suficientes para atingir 99 % da deformação máxima (Silva et al., 2000). Ao final do ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante para determinar a densidade do solo (Ds), índice de vazios (Iv) e grau de saturação (Gs).

A densidade do solo (Ds) foi calculada pela equação 1:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad \text{Eq. 1}$$

em que Ms é a massa de solo seco (kg) em estufa a 105 °C; e V, o volume da amostras de solo (dm³).

O índice de vazios foi calculado pela equação 2:

$$I_v = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Eq. 2}$$

em que Vv é o volume de vazios; e Vs, o volume de sólidos.

O grau de saturação foi calculado pela equação 3:

$$G_s = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{Eq. 3}$$

em que Vw é o volume de água; e Vv, o volume de vazios para um mesmo volume de solo.

A porosidade total correspondeu ao volume de água contido na amostra de solo saturado, enquanto a microporosidade correspondeu à umidade volumétrica quando a amostra esteve sob tensão de 6 kPa. A macroporosidade, por sua vez, foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (Embrapa, 1997).

O grau de compactação (GC) foi calculado pela equação: GC = (Ds/Ds_{cIHO}) × 100, que relaciona a densidade do solo com um valor de densidade de referência restritivo ao crescimento das plantas, sendo Ds_{cIHO} = 1,83803 - 0,00078 × %argila (Reichert et al., 2009b), em que Ds_{cIHO} corresponde a IHO = zero. A equação é válida para resistência à penetração de 2 kPa, espaço aéreo de 10 %, capacidade de campo de 10 kPa e ponto de murcha permanente de 1.500 kPa.

A pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (Ic) foram calculados segundo o

método de Casagrande (Holtz e Kovacs, 1981), com a relação deformação/carga obtida no longo das pressões aplicadas. A reta virgem foi definida pela reta tangente ao ponto de inflexão da curva de compressão ajustada; e a σ_p , estimada pelo valor de σ_p na intersecção da reta virgem com a reta bisetriz. O ponto de máxima curvatura foi calculado numericamente partir do ponto de mínimo da segunda derivada da equação de van Genuchten (1980), usada para descrever a curva de compressão com um programa computacional desenvolvido por Gubiani et al. (comunicação pessoal).

Para determinar a permeabilidade do solo ao ar, amostras previamente saturadas foram colocadas na mesa de tensão onde foram equilibradas a uma tensão de 10 kPa, que é uma estimadora da condição de capacidade de campo. O procedimento seguinte foi o de aplicação de cargas estáticas (25 e 200 kPa) na prensa uniaxial pelo período de 5 min cada uma. As amostras comprimidas foram submetidas à medida de condutividade ao ar.

O permeâmetro de ar consiste em um aparelho para a medição do fluxo de ar numa amostra de solo, à baixa pressão (0,1 kPa) e constante (para evitar fluxo turbulento), com o uso de fluxímetros com diferentes vazões.

Para o cálculo da condutividade ao ar (K_l , cm s⁻¹), foi utilizada a seguinte equação 4:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V L}{\Delta t \Delta p A}, \quad \text{Eq. 4}$$

e a permeabilidade ao ar (K_a , μm^2) foi calculada a partir da condutividade ao ar (Equação 5):

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g}, \quad \text{Eq. 5}$$

em que ρ_l é a densidade do ar na medição (kg m⁻³); g , a aceleração da gravidade (9,81 m s⁻²); ΔV , o volume de ar (m³) que passa pela amostra durante o tempo Δt (min), medido por meio de fluxímetros de passagem de ar; L , a altura da amostra (m); Δp , a pressão de ar aplicada (hPa); A , a área superficial da amostra (m²); e η , a viscosidade do ar (g s⁻¹ cm⁻¹), obtida de valores tabulados.

O cálculo da densidade do ar, usado na fórmula anterior, é dado por (Equação 6):

$$\rho_l = \rho_n \times \left(\frac{T_n \times p}{\rho_n \times T} \right), \quad \text{Eq. 6}$$

em que ρ_l é a densidade do ar no momento da medição (kg m⁻³); ρ_n , densidade-padrão do ar (1.293 kg m⁻³); T_n , a temperatura-padrão (°K); p , a pressão atmosférica no momento da medição (mbar), fornecida pela estação meteorológica; p_n , a pressão atmosférica-padrão (1.013 mbar); e T , a temperatura do ar no momento da medição (°K), com a utilização de um termômetro.

A análise estatística constou do teste t, da correlação linear e dos contrastes ortogonais. O teste “t” de

significância foi utilizado para as interpretações dos resultados da K_a , microporosidade, macroporosidade, porosidade total e D_s . A influência das variáveis independentes (I_v , D_s , COT, areia e argila) nas variáveis dependentes (σ_p e I_c) foi avaliada por correlação linear de Pearson, utilizando amostras coletadas em todos os horizontes.

O efeito dos diferentes solos em relação às propriedades analisadas (σ_p , I_c , D_s , I_v e G_s) foi avaliado pela significância dos contrastes ortogonais dos horizontes superficiais (A_p , A e A_1) dos cinco perfis: Gleissolos × Argissolos - GX × PV; Gleissolo cota inferior × Gleissolo cota superior - GX [1 × 2]; Argissolo da encosta inferior e superior × Argissolo do topo - PV [(3, 4) × (5)]; e Argissolo da encosta inferior × Argissolo da encosta superior - PV [3 × 4]. As análises estatísticas foram realizadas no *software Statistical Analysis System* (SAS, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físico-mecânicas

A granulometria dos horizontes superficiais dos Gleissolos apresentou mais areia e menos argila do que os horizontes superficiais dos Argissolos, com exceção do PV3 que evidenciou maior teor de areia que o GX1 no horizonte A (Quadro 1).

A quantidade de argila apresentou correlação positiva com a σ_p (0,324) (Quadro 2). Isso evidencia que os horizontes mais argilosos demonstraram maior capacidade de suporte de carga, em razão da maior força de coesão entre as partículas de argila, dificultando a separação e o deslocamento dessas quando uma pressão é aplicada (Imhoff et al., 2001; Reichert et al., 2010). Avaliando essa mesma relação em alguns solos do Rio Grande do Sul, Suzuki et al. (2008) também observaram tal comportamento e notaram o aumento da capacidade de suporte de carga com o acréscimo do teor de argila.

Não houve correlação significativa entre a σ_p e o I_c com o carbono orgânico total (COT), que é o

Quadro 2. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis dependentes pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (I_c) e as variáveis independentes índice de vazios (I_v), densidade do solo (D_s), teores de areia, argila e carbono orgânico total (COT) dos solos da topossequência Argissolo-Gleissolo

	I_v	D_s	Areia	Argila	COT
σ_p	0,012 ^{ns}	0,022 ^{ns}	-0,320**	0,324**	-0,129 ^{ns}
I_c	0,774**	-0,784**	-0,187 ^{ns}	0,226*	-0,058 ^{ns}

* e **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente; ^{ns}: não significativo.

principal constituinte da matéria orgânica do solo (Quadro 2). A inexistência desse efeito significativo pode ser por causa da pequena variação na quantidade de COT nos solos avaliados (Quadro 1), condição associada à inexistência de práticas que favoreçam o seu acúmulo no solo. Contudo, quando esse efeito é avaliado em áreas com altos teores de COT, geralmente são observadas correlações positivas da relação desse parâmetro com a σ_p (Veiga et al., 2007; Braida et al., 2010), haja vista que a matéria orgânica é importante componente que pode influenciar os parâmetros compressivos e cisalhantes do solo (Braida et al., 2006, 2007a,b, 2008, 2010, 2011).

Não foram observados maiores valores de σ_p em solos mais densos e com menor I_v (Quadro 2), pois nessas condições há maior contato entre partículas minerais, o que pode elevar a capacidade de suporte, como observado por Silva et al. (2002) e Vogelmann et al. (2012). Em um Argissolo Vermelho de textura franco-arenosa, Lima et al. (2006) não diagnosticaram efeito da D_s na σ_p e relacionaram tal constatação ao reduzido grau de saturação do solo, condição também observada na maioria das amostras analisadas neste estudo. Em elevada quantidade, a água atua como uma espécie de lubrificante entre as partículas do solo, o que reduz a coesão e o ângulo de atrito interno, diminuindo a resistência do solo à deformação (Cunha et al., 2002).

A água é determinante na ocorrência da compactação, pois atua como lubrificante entre as partículas, reduzindo a coesão e o atrito, permitindo o deslocamento dessas quando uma pressão é exercida sobre a superfície do solo (Gubiani et al., 2013a). Portanto, essa condição indica a necessidade de cuidados com o tráfego de máquinas em solos argilosos com elevada umidade, o que pode favorecer a ocorrência do processo de compactação.

A suscetibilidade à compactação evidenciou-se sensível à condição estrutural, pois o I_c correlacionou-se significativamente e positivamente com o I_v ($r = 0,774$) e negativamente com a D_s ($r = -0,784$) (Quadro 2). Isso ocorre porque em solos mais densos e com menor espaço poroso existem mais pontos de contatos entre as partículas e agregados, dificultando a movimentação das partículas (Imhoff et al., 2001; Braida et al., 2010) ao mesmo tempo em que promove a redução dos valores do I_c .

O I_c também se correlacionou significativamente (Quadro 2) com o teor de argila ($r = 0,226$). Como um elevado valor de I_c indica uma condição de maior suscetibilidade à compactação, confirmou-se que essa suscetibilidade foi maior nos solos argilosos, corroborando os trabalhos de Imhoff et al. (2001) e Suzuki et al. (2008). Esse comportamento é reflexo da quantidade de microporos e ação das forças de adesão entre a argila e a água, aumentando a quantidade de água retida em determinada tensão quando comparados solos argilosos a arenosos.

Foi observada probabilidade de 94 % de a classe dos Gleissolos apresentar maior capacidade de suporte de carga que a dos Argissolos (contraste $GX \times PV$) (Quadro 3). Nesse caso, o efeito da D_s foi mais importante na distinção entre essas classes de solo que a σ_p . O contraste $GX \times PV$ indicou probabilidade de 93 % de a D_s ser maior nos Gleissolos em relação aos Argissolos. Apesar de não ter sido observada correlação significativa entre densidade e σ_p , os trabalhos de Silva et al. (2002) e Vogelmann et al. (2012) demonstraram que solos mais densos apresentam maior empacotamento e mais pontos de contatos entre as partículas, o que eleva a capacidade de suportar cargas. Porém, na toposequência analisada, os Gleissolos permanecem, a maior parte do tempo, saturados com água, com umidade superior à condição avaliada neste estudo. Nesse caso, a elevada umidade irá reduzir a capacidade de suporte de carga, pois o solo nessa condição adquire condição plástica (semissólida), ficando susceptível a grandes deformações não recuperáveis (plásticas), aumentando significativamente o risco de compactação quando esses solos são trafegados por máquinas ou pisoteados por animais.

Uma baixa probabilidade de ocorrer diferenças foi observada nos contrastes que comparam os valores de σ_p dos dois Gleissolos ($GX [1 \times 2]$), dos Argissolos da porção inferior e superior da encosta com o Argissolo localizado no topo da coxilha ($PV [(3, 4) \times (5)]$) e do Argissolo da porção inferior com o Argissolo da porção superior da encosta ($PV [3 \times 4]$) (Quadro 3). Essa semelhança na capacidade de suporte de carga do solo é reflexo da intrínseca relação dessa propriedade com o teor de argila e conseqüentemente da reduzida variação na granulometria quando comparados os Argissolos (Quadro 1), referenciado pela correlação observada entre σ_p e argila (Quadro 2), comportamento semelhante na capacidade de suporte de carga.

O contraste $GX \times PV$ para a variável I_c indicou que os Gleissolos são menos suscetíveis à compactação que os Argissolos. Além disso, comparando os dois Gleissolos em estudo ($GX [1 \times 2]$), o contraste indica probabilidade de 91 % de o Gleissolo da cota superior ser menos suscetível à compactação que o da cota inferior. Nesse caso, além da D_s , o I_v também influenciou tal comportamento. Em um solo mais denso e, portanto, com o volume de poros reduzidos, a organização estrutural apresenta maior número de pontos de contato entre as partículas e os agregados, tornando o solo mais resistente. No entanto, esse resultado não significa melhoria estrutural, e sim maior resistência a deformações quando pressões superiores a σ_p são aplicadas ao solo (Suzuki et al., 2008).

Além da maior D_s dos Gleissolos em relação à dos Argissolos, ocorreram diferenças significativas para essa variável nos demais contrastes analisados (Quadro 3). O Gleissolo coletado na cota superior

Quadro 3. Pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (I_c), densidade do solo inicial (D_s), índice de vazios (I_v), grau de saturação inicial (G_s), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes superficiais (A, A1 e Ap) dos perfis da topossequência Argissolo-Gleissolo

Perfil ⁽¹⁾	Horizonte	Médias	Contrastes	Estimativa	T	Pr>t
σ_p (kPa)						
GX1	A	127,20	GX \times PV	114,8833	2,03	0,0595
GX2	A1	153,40	GX [1 \times 2]	-26,2000	-0,99	0,3367
PV3	Ap	107,67	PV [(3, 4) \times (5)]	-22,8333	-0,43	0,6702
PV4	Ap	80,00	PV [3 \times 4]	27,6666	0,87	0,3993
PV5	Ap	105,25	-	-	-	-
I_c						
GX1	A	0,11	GX \times PV	-0,2407	-7,30	<0,0001
GX2	A1	0,08	GX [1 \times 2]	0,0280	1,82	0,0880
PV3	Ap	0,19	PV [(3, 4) \times (5)]	0,0042	0,14	0,8936
PV4	Ap	0,17	PV [3 \times 4]	0,0142	0,76	0,4575
PV5	Ap	0,18	-	-	-	-
D_s (kg dm ⁻³)						
GX1	A	1,62	GX \times PV	0,1633	1,94	0,0706
GX2	A1	1,74	GX [1 \times 2]	-0,1180	-3,00	0,0084
PV3	Ap	1,61	PV [(3, 4) \times (5)]	-0,3567	-4,55	0,0003
PV4	Ap	1,49	PV [3 \times 4]	0,1097	2,31	0,0349
PV5	Ap	1,73	-	-	-	-
I_v						
GX1	A	0,58	GX \times PV	-0,1090	-1,23	0,2361
GX2	A1	0,47	GX [1 \times 2]	0,1080	2,61	0,0189
PV3	Ap	0,56	PV [(3, 4) \times (5)]	0,2725	3,61	0,0044
PV4	Ap	0,69	PV [3 \times 4]	-0,1275	-2,55	0,0213
PV5	Ap	0,49	-	-	-	-
G_s (%)						
GX1	A	49,79	GX \times PV	-6,1112	-0,74	0,4677
GX2	A1	64,13	GX [1 \times 2]	-14,3420	-3,74	0,0018
PV3	Ap	57,55	PV [(3, 4) \times (5)]	-32,1983	-4,22	0,0007
PV4	Ap	44,94	PV [3 \times 4]	12,6067	2,72	0,0151
PV5	Ap	67,34	-	-	-	-

⁽¹⁾ Gleissolos Háplicos: GX1 e GX2; Argissolos Vermelhos: PV3, PV4 e PV5.

da planície aluvial apresentou maior D_s que o coletado na cota inferior [GX (1 \times 2)]. Considerando os solos da encosta, o Argissolo da porção inferior apresentou maior densidade que a porção superior [PV (3 \times 4)], enquanto o Argissolo localizado no topo foi o que evidenciou a maior D_s . Essa maior D_s deve-se ao manejo do solo e ao tráfego de máquinas agrícolas para a implantação das pastagens anuais, além do pisoteio intenso dos animais no pastejo. Gubiani et al. (2013b) em seu trabalho verificaram menor D_s em solo escarificado e aumento dessa em solo sob plantio direto com tráfego. Após a realização das arações e gradagens, o solo manejado no sistema convencional apresentou maior I_v , que pode vir a ser reduzido se cargas maiores que a σ_p

forem aplicadas (Veiga et al., 2007), quando esse for pastoreado ou trafegado.

O I_v apresentou comportamento inverso à variável D_s para os contrastes avaliados, ou seja, o Gleissolo da cota superior evidenciou menor I_v que o coletado na cota inferior, enquanto entre os Argissolos o localizado no topo foi o que demonstrou menor I_v . No entanto, quando contrastadas as duas classes de solos, não houve diferenças significativas. Essas constatações colaboram no entendimento dos efeitos da condição estrutural na capacidade de suporte de carga e na suscetibilidade à compactação de uma topossequência, pois um solo com um menor I_v referencia uma estrutura com maior número de pontos de contatos entre as partículas minerais

e orgânicas, dificultando o rearranjo e o deslocamento dessas partículas a um estado de maior densidade, quando aplicada nova carga (Braidá et al., 2010), reduzindo consequentemente a suscetibilidade à compactação.

Não houve diferença entre as classes de solo para a variável Gs. Para os demais contrastes, diferenças significativas ocorreram, e maiores Gs foram observados nos solos que apresentaram maior densidade. Em um solo mais denso, geralmente a quantidade de macroporos é menor e a de microporos é maior, o que proporciona maior conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (Reichert et al., 2007), condição em que as amostras estavam durante a realização dos ensaios de compressão uniaxial.

O grau de compactação apresentou maiores valores depois de aplicada a carga de 200 kPa. Porém, mesmo após a aplicação da maior carga (200 kPa), não foram atingidos os valores limitantes ao crescimento das plantas propostos por Reichert et al. (2009b), indicando que os horizontes dos perfis avaliados apresentam capacidade de suporte satisfatoriamente elevada e não sofrem deformações capazes de reduzir drasticamente a produção dos cultivos (Quadro 4). Segundo Suzuki et al. (2008), algumas culturas agrícolas como o feijão e a soja evidenciam boa produtividade em Argissolos com grau de compactação variando de 85 a 94 %, indicando que as condições apresentadas pelos horizontes mesmo após a deformação pela aplicação da carga de 200 kPa não tornam o solo inadequado

para o cultivo. Contudo, ressalta-se que grau de compactação tende a aumentar à medida que aumentam as cargas aplicadas ao solo; dessa forma, cargas superiores a 200 kPa podem resultar na deformação do solo em níveis prejudiciais ao desenvolvimento das plantas.

Permeabilidade ao ar

Os valores de permeabilidade ao ar (Ka) foram maiores nos horizontes Ap, A1 e Bg dos solos PV3, PV5 e GX1, respectivamente (Quadro 5). Segundo Alaoui et al. (2011), a permeabilidade ao ar é maior normalmente nas camadas mais superficiais, onde a quantidade e continuidade de poros é maior.

As amostras de todos os horizontes quando submetidas à carga de 25 kPa apresentaram valores de macroporosidade em torno de 0,10 m³ m⁻³ (Quadro 4), que foi preconizado por Vomocil e Flocker (1966) e Baver et al. (1972), como o mínimo necessário ao crescimento e desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares. Entretanto, com o aumento das cargas houve redução desses valores, chegando em níveis inferiores ao nível crítico. Um dos efeitos da compactação é a redução do volume de poros, causando reagrupamento das partículas. O aumento da Ds e a redução da porosidade alteram a capacidade de trocas gasosas, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência do solo à penetração, ocasionando impedimento mecânico ao crescimento de raízes (Reichert et al., 2007).

A Ka foi maior quando as amostras foram submetidas à menor carga (25 kPa) (Quadro 5),

Quadro 4. Porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds) e grau de compactação (GC) dos horizontes superficiais e subsuperficial dos perfis 1, 3 e 5 da toposequência Argissolo-Gleissolo, para duas cargas externas aplicadas

Horizonte	Carga kPa	Pt	Macro m ³ m ⁻³	Micro	Ds kg dm ⁻³	GC %
Perfil 1 - GX1 ⁽¹⁾						
A	25	0,44	0,12	0,32	1,42	77
	200	0,37	0,05	0,32	1,62	88
Bg	25	0,42	0,12	0,31	1,48	80
	200	0,40	0,10	0,31	1,54	83
Perfil 3 - PV3						
Ap	25	0,42	0,18	0,25	1,45	78
	200	0,36	0,09	0,27	1,60	87
A1	25	0,40	0,16	0,24	1,51	82
	200	0,36	0,11	0,25	1,61	87
Perfil 5 - PV5						
Ap	25	0,34	0,10	0,25	1,68	91
	200	0,32	0,06	0,26	1,74	94
A1	25	0,42	0,14	0,28	1,51	81
	200	0,38	0,08	0,31	1,60	86

⁽¹⁾ Gleissolo Háplico: GX1; Argissolos Vermelhos: PV4 e PV5.

Quadro 5. Teste “t” dos valores de permeabilidade ao ar, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo nos horizontes superficiais dos perfis estudados da topossequência Argissolo-Gleissolo

Perfil ⁽¹⁾	Horizonte	Carga aplicada		Desvio-padrão	Valor t	Probabilidade
		25 kPa	200 kPa			
Permeabilidade ao ar (µm ²)						
GX1	A	54,27	49,39	39,31	0,18	ns
	Bg	75,00	55,97	77,49	1,11	ns
PV3	Ap	99,57	41,73	68,68	0,48	ns
	A1	59,62	23,91	19,60	0,22	ns
PV5	Ap	27,31	13,90	18,36	0,50	ns
	A1	81,25	21,63	25,41	0,56	ns
Porosidade total (m ³ m ⁻³)						
GX1	A	0,34	0,32	±0,02	0,040	*
	Bg	0,42	0,38	±0,02	0,090	ns
PV3	Ap	0,42	0,36	±0,03	0,040	*
	A1	0,40	0,36	±0,01	0,001	***
PV5	Ap	0,45	0,37	±0,04	0,120	ns
	A1	0,43	0,41	±0,01	0,010	**
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)						
GX1	A	0,09	0,06	±0,02	0,010	**
	Bg	0,14	0,08	±0,02	0,300	ns
PV3	Ap	0,18	0,09	±0,04	0,020	*
	A1	0,16	0,11	±0,01	0,001	***
PV5	Ap	0,13	0,05	±0,02	0,010	**
	A1	0,12	0,10	±0,01	0,001	***
Microporosidade (m ³ m ⁻³)						
GX1	A	0,25	0,26	±0,00	0,970	ns
	Bg	0,28	0,31	±0,01	0,870	ns
PV3	Ap	0,25	0,27	±0,01	0,020	*
	A1	0,24	0,25	±0,01	0,050	*
PV5	Ap	0,32	0,32	±0,03	0,110	ns
	A1	0,31	0,31	±0,01	0,110	ns
Densidade do solo (kg dm ⁻³)						
GX1	A	1,69	1,74	±0,02	0,040	*
	Bg	1,51	1,60	±0,05	0,120	ns
PV3	Ap	1,45	1,60	±0,05	0,040	*
	A1	1,51	1,61	±0,02	0,001	***
PV5	Ap	1,42	1,62	±0,05	0,030	*
	A1	1,48	1,54	±0,04	0,001	***

⁽¹⁾ Gleissolo Háplico: GX1; Argissolos Vermelhos: PV3 e PV5. ns: não significativo; *, ** e ***: significativo a 0,05; 0,01; e 0,001, respectivamente.

reduzindo com a aplicação de cargas mais altas. Esse comportamento está relacionado à pressão de σ_p dos horizontes, que apresentam valores de σ_p maiores que essas cargas; assim, cargas inferiores à capacidade de suporte do solo não promoveram grandes alterações na estrutura porosa e não influenciaram a capacidade de aeração. Entretanto, no horizonte Ap do perfil 5, verificou-se drástica redução da permeabilidade ao ar, um reflexo da redução pela compactação da porosidade total e

da macroporosidade do solo. De acordo com Horn (2003), o fluxo de gás é reduzido pela diminuição no diâmetro dos poros, pelo aumento da saturação de água e pela elevação da compactação do solo, pois as partículas e, ou, poros do solo se reorganizam, causando anisotropia das funções do poro.

Assim, os resultados demonstram que a aplicação de níveis crescentes de carga mecânica nos ensaios de compressão unidimensional, sob pressão considerada leve (25 kPa), não produziu efeitos

negativos sobre a estrutura do solo. Tais pressões situam-se frequentemente abaixo das pressões historicamente submetidas ao solo, logo se mantêm inalteradas as características iniciais.

O resultado acima exposto contempla a hipótese do trabalho de que pressões inferiores à pressão de preconsolidação não interferem significativamente na estrutura e porosidade do solo. Entretanto, Bortoluzzi et al. (2008) verificaram que a aplicação de níveis crescentes de estresse mecânico nos ensaios de compressão unidimensional, mesmo sob pressões consideradas fracas (inferiores a 50 kPa), produziram efeitos negativos sobre a estrutura do solo e a repartição do espaço poroso entre o ar e a água em razão do rearranjo da estrutura da matriz sólida aos estresses sofridos, reduzindo a aeração de um Argissolo Vermelho. A diferença nos resultados decorre do estado estrutural do solo e da possibilidade de a compressão obstruir poros especialmente na superfície da amostra.

Após a aplicação da carga de 200 kPa, nos perfis 1, 2, 4 e 5, observou-se redução da permeabilidade ao ar diferindo significativamente do valor obtido anteriormente à aplicação da carga. Isso está associado à deformação ocasionada pela aplicação da carga e ao deslocamento e rearranjo de partículas e de agregados, com redução na quantidade de macroporos e na porosidade total e aumento na quantidade de microporos. Com isso, houve impedimento à passagem de ar pelos poros, diminuindo a K_a do solo. Isso corrobora o encontrado por Horn (2003) em um solo que sofreu compressão unidimensional de 150 kPa, em que houve diminuição da K_a e da porosidade do solo, como consequência do aumento no conteúdo volumétrico de sólidos e na D_s do solo e drástica redução na macroporosidade. Além disso, Alaoui et al. (2011) acrescentaram que os efeitos podem ser agravados até o ponto de inviabilizar a continuidade do sistema e, assim, reduzir severamente a difusão de gases no solo.

CONCLUSÕES

Na condição de capacidade de campo, Gleissolos apresentam maior capacidade de suporte e, portanto, são menos suscetíveis à compactação que os Argissolos; os últimos evidenciam comportamento semelhante em relação ao suporte de cargas, independentemente da sua posição na toposequência.

O aumento na quantidade de argila na toposequência promove a elevação da capacidade de suporte de carga, enquanto a suscetibilidade à compactação é reduzida em solos mais densos e elevada em solos mais argilosos e com maior índice de vazios, exceto em condições de elevada umidade do solo quando a água lubrifica as superfícies aumentando a suscetibilidade à compactação dos solos.

A macroporosidade e permeabilidade ao ar são maiores na camada superficial e não são alteradas quando o solo é submetido à aplicação de cargas de até 25 kPa. Contudo, quando submetido à aplicação de cargas superiores a 200 kPa, promove-se a redução do volume de macroporos e porosidade total em níveis inferiores ao limite crítico. Porém, mesmo após a aplicação da carga de 200 kPa, os solos não atingem os valores críticos de densidade ou elevados graus de compactação e, portanto, não se tornam inadequados ou limitantes ao crescimento das plantas.

REFERÊNCIAS

- Alaoui A, Lipiec J, Gerke HH. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Till Res.* 2011;115/116:1-15.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 1. 2007: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: 1990.
- Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. *Soil physics*. 4th.ed. New York: John Wiley & Sons; 1972.
- Bortoluzzi EC, Silva VR, Petry C, Cecchetti D. Porosidade e retenção de água em um Argissolo sob manejo convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:1447-57.
- Braida JA, Bayer C, Albuquerque JA, Reichert JM. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *Tópicos Ci Solo.* 2011;7:221-78.
- Braida JA, Reichert JM, Reinert DJ, Sequinatto L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:477-85.
- Braida JA, Reichert JM, Reinert DJ, Soares JMD. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. *Ci Rural.* 2007a;37:1646-53.
- Braida JA, Reichert JM, Reinert DJ, Veiga M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *R Bras Eng Agríc Amb.* 2010;14:131-9.
- Braida JA, Reichert JM, Soares JMD, Reinert DJ. Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um Nitossolo Vermelho distrófico. *R Bras Ci Solo.* 2007b;31:379-86.
- Braida JA, Reichert JM, Veiga M, Reinert DJ. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *R Bras Ci Solo.* 2006;30:605-14.
- Cunha JPAR, Vieira LB, Magalhães AC. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Eng Agríc.* 2002;10:573-81.
- Dias Junior MS, Pierce FJ. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R Bras Ci Solo.* 1996;20:175-82.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Manual de métodos de análise de solos. Brasília, DF: 1997.

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: 2006.
- Gubiani PI, Albuquerque JA, Reinert DJ, Reichert JM. Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia, em dois solos com elevada densidade. *Ci Rural*. 2009;39:2535-8.
- Gubiani PI, Goulart RZ, Reichert JM, Reinert DJ. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *R Bras Ci Solo*. 2013b;37:1-10.
- Gubiani PI, Reichert JM, Reinert DJ. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. *R Bras Ci Solo*. 2013a;37:1-10.
- Holtz RD, Kovacs WD. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice-Hall; 1981.
- Horn R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*. 2003;116:77-88.
- Imhoff S, Silva AP, Dias Júnior MS, Tormena CA. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R Bras Ci Solo*. 2001;25:11-8.
- Jenny H. Factors of soil formation. New York: McGraw-Hill; 1941.
- Lima CLR, Reinert DJ, Reichert JM, Suzuki LEAS. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. *Ci Rural*. 2006;36:1765-72.
- Nimer E. Climatologia do Brasil. 2ª.ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais; 1989.
- Reichert JM, Kaiser DR, Reinert DJ, Riquelme UFB. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesq Agropec Bras*. 2009a;44:310-9.
- Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki LEAS, Horn R. Mecânica do solo. In: De Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010. p.29-102.
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert DJ, Horn RHI. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till Res*. 2009b;102:242-54.
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert DJ. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos Ci Solo*. 2007;5:49-134.
- Reinert DJ, Reichert JM. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo - protótipos e teste. *Ci Rural*. 2006;36:1931-5.
- SAS Institute. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5th.ed. Cary: 1999.
- Silva VR, Reinert DJ, Reichert JM, Soares JM. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. *R Bras Ci Solo*. 2002;26:1-8.
- Silva VR, Reinert DJ, Reichert JM. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R Bras Ci Solo*. 2000;24:239-49.
- Suzuki LEAS, Reinert DJ, Reichert JM, Lima CLR. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:963-73.
- Tang AM, Cui Y, Richard G, Défossez D. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. *Geoderma*. 2011;162:171-81.
- Uhde LT. Sistema Pedológico em um ambiente antropizado da Depressão Central do RS. [tese] Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2009.
- van Genuchten, MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*. 1980;44:892-8.
- Veiga M, Horn R, Reinert DJ, Reichert JM. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil Till Res*. 2007;92:104-13.
- Vogelmann ES, Mentges MI, Reichert JM, Rosa DP, Barros CAP, Reinert DJ. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado e escarificado. *Ci Rural*. 2012;42:291-7.
- Vomocil JA, Flocker WJ. Effect of soil compaction storage and movement of soil, air and water. *Trans Am Soc Agric Eng*. 1966;4:242-6.