

PERMEABILIDADE AO AR EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO⁽¹⁾

Sueli Rodrigues⁽²⁾, Alvaro Pires da Silva⁽³⁾, Neyde Fabíola Balarezo
Giarola⁽⁴⁾ & Jadir Aparecido Rosa⁽⁵⁾

RESUMO

A permeabilidade ao ar pode ser utilizada para avaliar alterações que ocorrem na estrutura do solo em virtude da adoção de diferentes sistemas de manejo. Este estudo testou a hipótese de que o menor revolvimento do solo sob sistema plantio direto resulta na formação de poros mais contínuos e melhor condição de aeração no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio da permeabilidade ao ar (K_a), da porosidade de aeração (ϵ_a) e dos índices de continuidade de poros (K_I e N), a aeração em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD). Oitenta amostras de solo (2 tratamentos x 2 profundidades x 20 repetições) com estrutura indeformada foram coletadas de cada sistema de manejo do solo nas profundidades de 0–0,10 e 0,10–0,20 m em área experimental do Instituto Agronômico do Paraná, no município de Ponta Grossa, Paraná. Depois de saturadas e equilibradas em seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa), determinou-se a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração em cada potencial. Também foram determinados a densidade do solo, a densidade de partícula, o carbono orgânico e a porosidade. A densidade do solo não consistiu em fator limitante, ficando abaixo do limite crítico para solos argilosos nos dois sistemas. No SPD, o maior volume de microporos resultou em maior retenção de água no intervalo de umidade avaliado (-2 a -100 kPa) e em maior volume de poros bloqueados para o fluxo de ar (ϵ_b), ou seja, redução de K_a . Na profundidade avaliada (0–0,20 m), os índices de continuidade de poros (K_I e N) revelaram que o PC apresentou poros mais contínuos do que o SPD, contradizendo a hipótese testada.

Termos de indexação: aeração do solo, sistema plantio direto, preparo convencional, continuidade de poros.

⁽¹⁾ Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor realizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Recebido para publicação em dezembro de 2009 e aprovado em novembro de 2010.

⁽²⁾ Mestranda, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 9, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: srodrigu@esalq.usp.br

⁽³⁾ Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: apsilva@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG. Av. General Carlos Cavalcanti 4748, CEP 84030–900 Ponta Grossa (PR). E-mail: neydef@uepg.br

⁽⁵⁾ Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR. Área de Engenharia Agrícola, Av. Pres. Kennedy s/n – BR 376, km 496, Caixa Postal 129, CEP 84001-970 Ponta Grossa (PR). E-mail: jrosa@iapar.br

SUMMARY: SOIL AIR PERMEABILITY IN A RHODIC HAPLUDOX UNDER DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS

Air permeability (K_a) can be used to assess soil structure changes resulting from different tillage systems. This study tested the hypothesis that the reduced soil disturbance in no-tillage results in continuous pores and better soil aeration conditions. The objective was to evaluate the aeration of a Rhodic Hapludox under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), based on soil air permeability (K_a), air-filled porosity (ϵ_a) and indices of pore continuity (K_1 and N). Eighty undisturbed soil cores (2 treatments x 2 depths x 20 repetitions) were collected from each tillage system at 0–0.10 and 0.10–0.20 m in an experimental area of the Agronomic Institute of Paraná in Ponta Grossa, Paraná. After the samples had been saturated and equilibrated at six matric potentials (-2, -6, -10, -30, -70, and -100 kPa), the air permeability and air-filled porosity were determined for each matrix potential. The soil bulk density, particle density, organic carbon and soil porosity were also evaluated. Soil bulk density was not a limiting factor, with values below the critical limit for clay soils in both systems. In NT, the greater micropore volume was related to higher water retention in the evaluated moisture range (-2 to -100 kPa) and greater volume of pores blocked for air flow (ϵ_b), thus reducing K_a in this system. At 0–0.20 m, the indices of pore continuity (K_1 and N) indicated more continuous pores in CT than NT, contradicting the hypothesis tested.

Index terms: soil aeration; no-tillage system; conventional tillage; pore continuity.

INTRODUÇÃO

O ar do solo é uma fonte de energia para a atividade microbiana do solo e para o desenvolvimento das culturas (Bowen et al., 1983). A aeração limitada altera a dinâmica de nutrientes, modifica as reações químico-biológicas oxidativas para redutivas e promove crescimento deficiente das plantas (Horne & Sojka, 2006). O conhecimento da quantidade de ar disponível para as plantas é fundamental para as regiões em que se pratica a produção agrícola em larga escala.

As práticas de manejo do solo têm grande impacto sobre a sua aeração. As que promovem o revolvimento do solo com o auxílio de arados tendem a incrementar o volume de poros, a permeabilidade e o armazenamento de ar (Braunack & Dexter, 1989). No entanto, o revolvimento mecânico dos 20 ± 25 cm superficiais do solo consome energia, expõe as sementes das camadas mais profundas para a cama de semeadura e elimina grande parte da fauna ativa do solo ao incorporar a matéria orgânica (Andrén & Lagerlöf, 1983). O preparo contínuo compacta a camada de solo logo abaixo da profundidade de aração e cria condições críticas para as trocas de ar (Rydberg, 1987).

Cultivos sucessivos sob plantio direto tendem a aumentar a densidade das camadas de solo não cultivadas (Rydberg, 1987) e a diminuir o volume de macroporos (Douglas et al., 1980). Apesar do menor volume de macroporos em relação ao solo arado, no solo sob plantio direto a infiltração é mais rápida em função da maior continuidade de poros (Douglas et al., 1980).

Os efeitos das práticas de manejo na aeração do solo podem ser quantificados pela permeabilidade ao

ar (Stepniewski et al., 1994). A permeabilidade ao ar (K_a) é uma medida da capacidade do solo (material poroso) de conduzir ar (gases), em resposta a um gradiente de pressão, por um processo denominado fluxo de massa (ou fluxo convectivo) (Lal, 2000). Sob baixos gradientes de pressão, o fluxo de ar através do solo é comparável ao fluxo de água e pode ser estimado pela lei de Darcy (Nield & Bejan, 2006). De modo similar à condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar depende do conteúdo volumétrico de água e da quantidade, forma, tamanho e continuidade de poros (Roseberg & McCoy, 1990).

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é um atributo físico sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo na estrutura do solo e pode fornecer uma descrição significativa do estado de compactação do solo (Phillips & Kirkham, 1962). Em níveis similares de compactação, a permeabilidade ao ar é maior em solos com estruturas maiores (peds de 4–8 mm) do que naqueles com estruturas menores (peds < 2 mm) (Lipiec, 1992). Ball et al. (1994) relataram que, em experimentos de longa duração (20–25 anos) desenvolvidos em solos francos imperfeitamente drenados, a permeabilidade ao ar foi menor sob sistema plantio direto do que sob plantio convencional. Em outro estudo, Schjønning & Rasmussen (2000) observaram que a rede de poros de solos arenosos e franco-arenosos apresentou-se bem conectada, independentemente do sistema de manejo (convencional ou direto), mas em solos franco-siltosos arados a permeabilidade ao ar atingiu níveis limitantes, que foram melhorados com a adoção de quatro anos de plantio direto.

A permeabilidade ao ar é útil na caracterização dos poros do solo (Blackwell et al., 1990), e o

conhecimento de sua variação com o conteúdo de água no solo permite modelar a convecção de ar e o transporte de gases (Poulsen et al., 1999). A permeabilidade ao ar (K_a) e a porosidade de aeração (ϵ_a) têm sido relacionadas na tentativa de avaliar possíveis diferenças na geometria dos poros resultantes das práticas de manejo adotadas (Blackwell et al., 1990). A razão entre permeabilidade ao ar e volume de macroporos (Blackwell et al., 1990) ou permeabilidade ao ar e porosidade preenchida com ar (Ball et al., 1994) é considerada uma medida da continuidade dos poros e organização destes. Valores mais baixos da relação refletem uma continuidade dos poros muito reduzida devido à compactação (Lipiec & Glinski, 1997; Munkholm et al., 2002).

O conhecimento da quantidade de ar disponível no solo depois de realizadas as diferentes práticas de cultivo pode auxiliar os agricultores e pesquisadores a planejar com eficiência as exigências de manejo para a produção de uma dada cultura. Este estudo testou a hipótese de que o menor revolvimento do solo sob sistema plantio direto leva à formação de poros mais contínuos e, por sua vez, a uma melhor condição de aeração do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a aeração de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso cultivado há 23 anos sob sistema de plantio direto e plantio convencional, por meio da permeabilidade ao ar, porosidade de aeração e continuidade de poros.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Polo Regional de Pesquisa do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizado no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, nas coordenadas médias de 25° 06' S e 50° 09' O. O solo avaliado foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006), em relevo com declividade média de 0,8 m m⁻¹. A área avaliada vem sendo cultivada desde 1981 com sistema de rotação de culturas (aveia-preta ou trigo/soja e ervilhaca ou tremoço/milho).

Foram avaliados dois sistemas de manejo de solo: preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) de longa duração (23 anos), com parcelas de 5.000 m² (100 x 50 m) e 10.000 m² (100 x 100 m), respectivamente. O PC consistiu de uma aração e duas gradagens na profundidade de 20 cm. No PD, entre os anos de 1981 e 1988 realizou-se uma alternância de preparo com uso de aração e gradagem e semeadura direta em três ocasiões. A partir de 1989 a parcela passou a ser cultivada apenas sob SPD.

A amostragem foi realizada em abril de 2008, no estágio final da cultura do milho. De cada parcela experimental foram retiradas amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm³ (altura e diâmetro de 5 cm). As amostras, orientadas

verticalmente, foram coletadas nas profundidades de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, totalizando 80 amostras (2 tratamentos x 2 profundidades x 20 repetições). As amostras de solo foram, então, lentamente saturadas e, posteriormente, submetidas a diferentes potenciais mátricos (Ψ_m): -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa, utilizando câmaras de pressão (Klute, 1986). As amostras permaneceram nas câmaras até que o equilíbrio fosse atingido em cada potencial. Após atingir o equilíbrio, determinou-se a K_a pelo método adaptado de McKenzie & Dexter (1996), conforme Da Silva et al. (2009). Esse método é baseado no princípio da quantificação do decréscimo da pressão (h) em função do tempo (t), o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo. Segundo Kirkham (1946) o gráfico do logaritmo natural da pressão em função do tempo fornece o coeficiente angular S , em que:

$$S = \frac{\ln h_2 - \ln h_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Se S é linear numa faixa de pressão e tempo, então o comportamento é consistente com o fluxo laminar do ar, e a permeabilidade intrínseca ao ar, K_a , em m², é dada por:

$$K_a = \frac{\nu_a - Vl}{A P_a} |S| \quad (2)$$

em que ν_a é a viscosidade do ar (18,1 x 10⁻⁶ kg m⁻¹ s⁻¹ a 20 °C); V , o volume do reservatório, m³; l , a altura da amostra, m; A , a área da amostra, m²; P_a , a pressão do ar atmosférico (101,3 kPa a 20 °C); e $|S|$, o módulo da inclinação da reta da relação pressão versus tempo.

Os valores de K_a e ϵ_a foram relacionados usando a equação de Kozeny-Carman em uma forma análoga àquela dada por Ahuja et al. (1984):

$$K_a = M \epsilon_a^N \quad (3)$$

em que M e N são constantes empíricas. Esses autores consideraram o expoente N como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da K_a com o aumento da ϵ_a ou o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. A relação de K_a e ϵ_a foi ajustada para uma forma logarítmica da equação 3:

$$\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a \quad (4)$$

A relação linear na equação 4 pode ser caracterizada usando as três informações indicadas na figura 1: a inclinação da reta (N), o intercepto com o eixo $\log K_a$ no qual $\log \epsilon_a = 0$ (M), e o intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$, em que $\log K_a = 0$ (ϵ_b). O intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$ (em que $K_a = 1 \mu\text{m}^2$) é denominado de conteúdo de ar limitante e foi proposto por Ball et al. (1988) e Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo, que não faz parte do transporte convectivo de ar. Desse modo, ϵ_b é o valor de ϵ_a abaixo do qual o fluxo de ar através do

solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração e pode ser obtido da equação 3 pela equação 5.

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (5)$$

Outro índice de continuidade de poros K_L , proposto por Groenevelt et al. (1984), também foi calculado com base na relação entre K_a e ε_a :

$$K_L = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (6)$$

Finalizadas as determinações da K_a , as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, para obtenção da massa de solo seco. Para cada amostra, foram determinados os seguintes atributos:

- Densidade do solo (ρ_s) em Mg m⁻³, segundo Blake & Hartge (1986).
- Densidade de partículas (ρ_p), em Mg m⁻³, pelo método do picnômetro de gás hélio (modelo ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®), utilizando amostras de solo secas e passadas em peneira de 2,0 mm.
- Umidade gravimétrica (U) em cada potencial, em g g⁻¹, de acordo com Gardner (1986).
- Umidade volumétrica (θ) em cada potencial, em cm³ cm⁻³, obtida por: $\theta = (\rho_s/\rho_a)U$, em que ρ_a é a densidade da água (g cm⁻³).
- Porosidade total do solo (α) em cm³ cm⁻³ pela fórmula $\alpha = 1 - (\rho_s/\rho_p)$.
- Porosidade de aeração (ε_a) em cada potencial, em cm³ cm⁻³, calculada como a diferença entre o

conteúdo de água medido em cada potencial e a porosidade total estimada a partir das medidas da densidade de partículas para cada amostra: $\varepsilon_a = \alpha - \theta$.

g) Carbono orgânico (CO), em g dm⁻³, determinado para cada amostra pelo método da colorimetria (Cantarella & Quaggio, 2001).

h) Granulometria, determinada pelo método do densímetro (Gee & Bauder, 1986).

As análises estatísticas foram efetuadas no programa SAS (SAS, 2002). Os resultados foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parte do conjunto de atributos do solo avaliados é apresentada no quadro 1. O solo selecionado para o estudo foi classificado como muito argiloso (≥ 600 g kg⁻¹ de argila). A densidade do solo ficou abaixo do limite crítico para solos argilosos nos dois sistemas de manejo e nas duas profundidades. O maior teor de CO no SPD em superfície resultou em menor ρ_p , devido à baixa densidade da matéria orgânica (0,9 a 1,3 Mg m⁻³). Houve redução no teor de CO na camada de 0,10–0,20 m, em relação à camada superior, nos dois sistemas. Esse decréscimo é frequentemente evidenciado nos solos dos trópicos úmidos e, em particular, em solos brasileiros (Desjardins et al., 1991; Cavalieri et al., 2009).

Quadro 1. Atributos do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) em duas profundidades de amostragem

Atributo	Tratamento	Profundidade (m)	
		0,0–0,10	0,10–0,20
Areia, g kg ⁻¹	PC	62,1aB	60,5aA
	SPD	70,6aA	60,9bA
Silte, g kg ⁻¹	PC	272,2	277,6
	SPD	327,7	260,5
Argila, g kg ⁻¹	PC	665,7	661,9
	SPD	601,7	678,6
Carbono orgânico (CO), g dm ⁻³	PC	30,75aB	29,9aA
	SPD	36,43aA	29,08bA
Densidade de partículas (ρ_p), Mg m ⁻³	PC	2,65aA	2,65aA
	SPD	2,61bB	2,65aA
Densidade do Solo (ρ_s), Mg m ⁻³	PC	0,99	1,16
	SPD	0,97	1,08

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

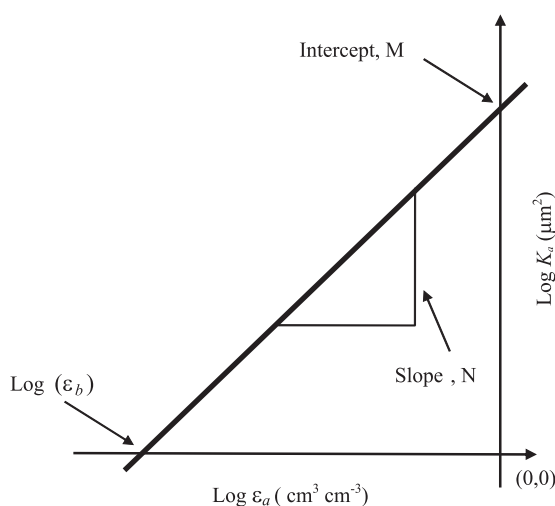


Figura 1. Principais características da relação log (conteúdo volumétrico de ar, ε_a) – log (permeabilidade ao ar - K_a); inclinação da reta, N ; intercepto com o eixo log (K_a), M ; e o limite do conteúdo de ar, ε_b .

A porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do solo foi influenciada pelos sistemas de manejo adotados. Os dois sistemas apresentaram redução no volume de macroporos em profundidade (Quadro 2). A maior macroporosidade superficial observada no PC em relação ao SPD deve-se ao revolvimento do solo por ocasião da aração (Kroulík, 2009). Apesar do menor volume de macroporos na camada superficial do solo sob SPD, o maior volume de microporos apresentado sob este sistema pode determinar maior retenção de água pelo solo e, por sua vez, maior fornecimento de água para as plantas. É importante destacar que o volume de macroporos observado nos dois sistemas é considerado adequado para o crescimento radicular.

A distribuição dos valores de K_a para os dois sistemas avaliados apresentou-se assimétrica e não normal. Diante disso, optou-se por ajustar os dados a distribuições mais próximas da normalidade, por meio da aplicação do logaritmo de K_a (Groenevelt et al., 1984; Ball et al., 1988; Blackwell et al., 1990).

Para entender melhor os valores de K_a é necessário conhecer a relação entre a porosidade de aeração (ϵ_a) e o conteúdo volumétrico de água (θ) (Figura 2). Normalmente, o aumento do conteúdo de água no solo reduz o volume de poros ocupados por ar, bem como os canais condutores de ar. Os resultados demonstraram que a maior microporosidade encontrada no SPD assegurou maior retenção de água no intervalo avaliado (-2 a -100 kPa), ou seja, maior volume de poros preenchidos com água, o que constitui um bloqueio para a passagem de ar, resultando em redução na K_a (Quadro 3).

Os valores de K_a , principalmente no Ψ_m de -2 kPa, foram altamente variáveis, com CV de 82,07 %, diminuindo com o decréscimo do potencial, apresentando CV de 41,46; 32,09; 23,12; 14,85; e 12,26 % para os Ψ_m de -6, -10, -30, -70 e -100 kPa, respectivamente. Os valores de K_a na umidade de

Quadro 2. Medidas de porosidade do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) em duas profundidades de amostragem

Porosidade	Tratamento	Profundidade (m)	
		0,0-0,10	0,10-0,20
$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$			
Macroporosidade	PC	0,247aA	0,116bA
	SPD	0,173aB	0,140bA
Microporosidade	PC	0,378aB	0,446bA
	SPD	0,456aA	0,452aA
Total	PC	0,624aA	0,562bB
	SPD	0,629aA	0,592bA

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

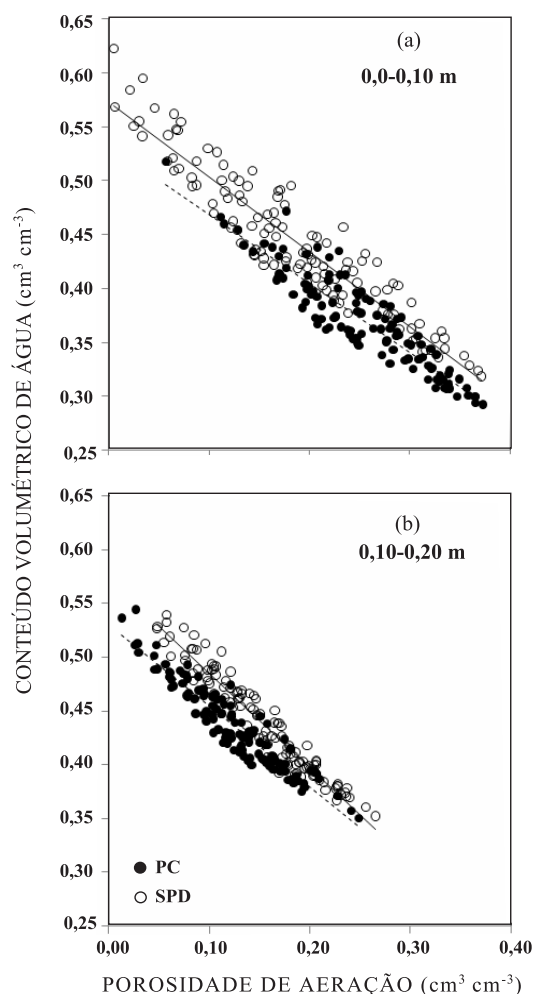


Figura 2. Porosidade de aeração (ϵ_a) em função do conteúdo volumétrico de água (θ) nos potenciais de -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

capacidade de campo (-10 kPa) estão de acordo com os encontrados por Cavalieri et al. (2009) em solo com 40 % de argila. No entanto, foram menores do que os encontrados por McKenzie & Dexter (1996) em um estudo do fluxo de água e ar através de agregados do solo. Esses autores afirmam que valores de K_a obtidos utilizando anéis volumétricos são sempre maiores em relação a agregados, provavelmente devido à existência de caminhos de fluxo preferenciais ao redor e entre os agregados nos anéis.

A K_a apresentou interação entre os tratamentos e a profundidade de amostragem apenas nos Ψ_m de -30 e -70 kPa (Quadro 3). Nos demais Ψ_m houve efeito simples para sistema de manejo e profundidade, com maior K_a na profundidade de 0,0-0,10 m do PC (Quadro 3). Geralmente, K_a e ϵ_a são maiores em solo arado do que em plantio direto pelo fato de o preparo alterar diretamente a porosidade do solo,

Quadro 3. Permeabilidade do solo ao ar (K_a) e índice de continuidade de poros (K_I) para o Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem

Sistema de manejo	Potencial mátrico	Profundidade (m)		Profundidade (m)	
		0,0–0,10	0,10–0,20	0,0–0,10	0,10–0,20
		$\log_{10} K_a$		$\log_{10} K_I$	
	kPa	μm^2			
PC	-2	1,690	0,397	2,424aA	1,608bA
SPD	-2	1,253	0,002	2,456aA	1,11bB
Sistema x Prof.		ns	ns	**	**
PC	-6	1,860	0,882	2,512aA	1,917bA
SPD	-6	1,512	0,455	2,412aA	1,401bB
Sistema x Prof.		ns	ns	**	**
PC	-10	1,974	1,269	2,59 3aA	2,227bA
SPD	-10	1,653	0,628	2,455aA	1,489bB
Sistema x Prof.		ns	ns	**	**
PC	-30	2,076 aA	1,675 bA	2,651aA	2,542aA
SPD	-30	1,948 aA	1,133 bB	2,649aA	1,894bB
Sistema x Prof.		**	**	**	**
PC	-70	2,198 aA	1,931 bA	2,744aA	2,744aA
SPD	-70	2,085 aA	1,527 bB	2,735aA	2,239bB
Sistema x Prof.		**	**	**	**
PC	-100	2,286	2,031	2,820aA	2,821aA
SPD	-100	2,176	1,715	2,805aA	2,407bB
Sistema x Prof.		ns	ns	**	**

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste LSD.

principalmente a macroporosidade (Ball et al., 1988). A permeabilidade do solo ao ar e à água ocorre principalmente nos macroporos e, assim, a maior macroporosidade do PC resultou em maior K_a . Feiza et al. (2008) investigaram a qualidade de um solo da Lituânia sob diferentes sistemas de manejo e verificaram que o preparo reduzido e o SPD não asseguraram uma K_a adequada no estágio final do crescimento da cultura, eles encontraram maior K_a sob o sistema convencional de manejo do solo.

Um solo com K_a de $1 \mu\text{m}^2$ ($\log K_a=0$) é considerado impermeável, onde os poros de aeração estão bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo do ar (McQueen & Shepherd, 2002). Essa condição foi observada na profundidade de 0,10–0,20 m no SPD, em condição próxima à saturação (-2 kPa) (Quadro 3). É possível encontrar K_a zero (ausência de fluxo) em um solo com porosidade elevada, caso todos os poros estejam preenchidos com água e, ou, estejam isolados (não conectados). Também é possível haver K_a próximo de zero se os poros apresentarem tamanho muito reduzido, situação frequentemente encontrada em solos com conteúdo elevado de argila (Roseberg & McCoy, 1992).

O índice de continuidade de poros K_I também apresentou distribuição log-normal, de forma que todas as análises posteriores foram executadas usando a transformação \log_{10} para cada amostra

individualmente. Os dados de K_I apresentaram interação entre os tratamentos de manejo e a profundidade de amostragem em todos os potenciais mátricos aplicados (Quadro 3). Para o SPD, observou-se maior continuidade ou menor tortuosidade dos poros na camada superficial no intervalo de umidade avaliado, enquanto no PC essa maior continuidade foi observada até o potencial -10 kPa; a partir daí, essa diferença foi suprimida.

Segundo Groenevelt et al. (1984), o cálculo da razão entre a K_a e a ϵ_a (K_I) é uma técnica útil para determinar se as diferenças na K_a podem ser atribuídas somente às diferenças na ϵ_a , ou se elas podem ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar, como a distribuição do tamanho, tortuosidade e continuidade dos poros. Solos com diferentes K_a , mas com valores similares de K_I , indicam similar distribuição de tamanho e continuidade de poros. Dessa forma, comparando os valores de K_I entre os sistemas de manejo, nas duas profundidades de amostragem, percebe-se que os sistemas de manejo não diferiram quanto à continuidade dos poros na camada superficial (0,0–0,10 m) e, na camada subsequente, foi maior no PC.

As raízes e a atividade biológica são os principais responsáveis pela criação de poros contínuos e alongados no solo. Ressalta-se que, no momento da coleta de amostras, a cultura instalada era o milho e

a distribuição do seu sistema radicular apresentava-se similar entre os dois sistemas de manejo avaliados. Visualmente, observou-se atividade biológica mais intensa no SPD, porém esta não foi eficiente para superar a maior porosidade criada pelo revolvimento do solo no PC (0–0,20 m). Schjønning & Rasmussen (2000), em um solo franco-siltoso, notaram que houve redução na continuidade dos poros na camada superficial (0–0,20 m) para diferentes solos sob semeadura direta, porém, abaixo de 0,20 m, houve aumento na continuidade dos macroporos. Possivelmente, a presença de poros mais contínuos no tratamento SPD, devido à atividade biológica mais intensa, seria verificada abaixo da camada arável, ou seja, abaixo de 0,20 m.

A K_a também foi relacionada com a ε_a por um modelo exponencial (Equação 4), obtendo-se as constantes M e N . O modelo ajustou adequadamente os dados ($R^2 > 0,88$), conforme demonstrado pela representação log-log na figura 3. A inclinação da reta (N) da relação log-log entre K_a e ε_a também é um índice de continuidade de poros e mostra a porcentagem de abertura dos caminhos dos poros contínuos disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da ε_a . A N foi maior no PC em relação ao SPD (Quadro 4), mas diferiu de K_I , o qual indicou a presença de poros mais contínuos na profundidade de 0,10–0,20 m nos dois sistemas de manejo.

Os valores de N para o solo sob PC foram semelhantes aos encontrados por Ball et al. (1988) em solo arado, porém esses autores reportaram maior N sob semeadura direta com valores mais altos do que os aqui obtidos para SPD. Os valores de N para a profundidade de 0–0,10 m também foram menores do que os encontrados por Ahuja et al. (1984), os quais encontraram N correspondente à constante de Kozeny-Carman na faixa de 4 a 5 quando relacionaram a condutividade hidráulica e a macroporosidade do solo. Assim, infere-se que a taxa de abertura de caminhos de poros contínuos disponíveis para o fluxo de água com o aumento do conteúdo de água é maior do que a taxa de abertura de caminhos similares disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da porosidade de aeração. Na camada de 0,10–0,20 m, os valores foram semelhantes aos encontrados por esses autores (Ahuja et al., 1984).

Um aumento em N com o aumento no conteúdo de argila para manejo de solos similares foi avaliado por Schjønning et al. (1999). Esses autores mencionaram que maior valor de N pode ser interpretado como solo de estrutura complexa. Então, um N significativamente maior ($N=2,82$) para o PC em relação ao SPD ($N=1,83$) na camada superficial, provavelmente, indica uma diferença na complexidade da estrutura do solo nessa camada. Entretanto, em profundidade (0,10–0,20 m), essa diferença não foi significativa.

A continuidade de poros determinada pela relação logarítmica entre K_a e ε_a apresentou comportamento inverso ao daquela determinada pela razão entre essas

duas variáveis (K_I). O primeiro método revelou poros supostamente mais contínuos na profundidade de 0,0–0,10 m, enquanto maior continuidade foi observada em 0,10–0,20 m quando determinada pelo segundo método. No entanto, nos dois métodos, o SPD apresentou menor continuidade ou maior tortuosidade em relação ao PC.

A análise de variância dos dados de ε_b , mostrou que na camada superficial, o PC apresentou maior volume de poros bloqueados (4,5 %); o inverso ocorreu na camada de 0,10–0,20 m, onde o volume de poros indisponível para o fluxo de ar foi maior no SPD (8,37 %) (Quadro 4). Utilizando o mesmo modelo da equação aqui empregada para um solo franco-argiloso na Escócia, Ball et al. (1988) estimaram volumes de ε_b na faixa de 0 a 3,6 %, com os maiores valores para o solo sob semeadura direta.

Os valores de N apresentados foram calculados com base na média da regressão de cada amostra individualmente, cada qual com seis pontos equivalentes às médias de K_a e ε_a em cada ψ_m . No entanto, outra abordagem pode ser utilizada, obtendo-se o intercepto e a inclinação da reta da relação log-log entre K_a e ε_a com todos os valores em cada potencial, em ambos os sistemas e profundidades (Figura 4).

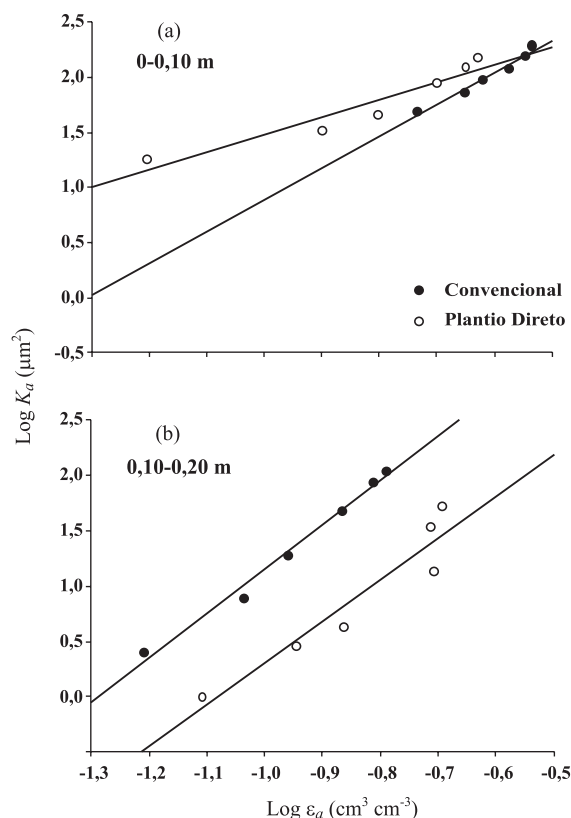


Figura 3. Relação logarítmica entre K_a e ε_a de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de manejo do solo e duas profundidades. Cada ponto representa a média das 20 amostras de cada tratamento nos seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa).

Quadro 4. Médias dos parâmetros da regressão do modelo $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$ e porosidade bloqueada, ϵ_b , no Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem

Profundidade	PC				SPD			
	Log M	N	R ²	ϵ_b	Log M	N	R ²	ϵ_b
m	% v/v							
0,0 –0,10	3,78 (0,63)	2,82 (0,79)	0,89	4,50 (1,79)	3,19 (0,55)	1,83 (0,93)	0,88	2,18 (2,45)
0,10–0,20	5,48 (1,35)	4,50 (1,81)	0,93	5,79 (3,04)	4,37 (1,11)	4,10 (1,47)	0,92	8,37 (3,17)

Valores entre parênteses representam ± 1 erro-padrão da média.

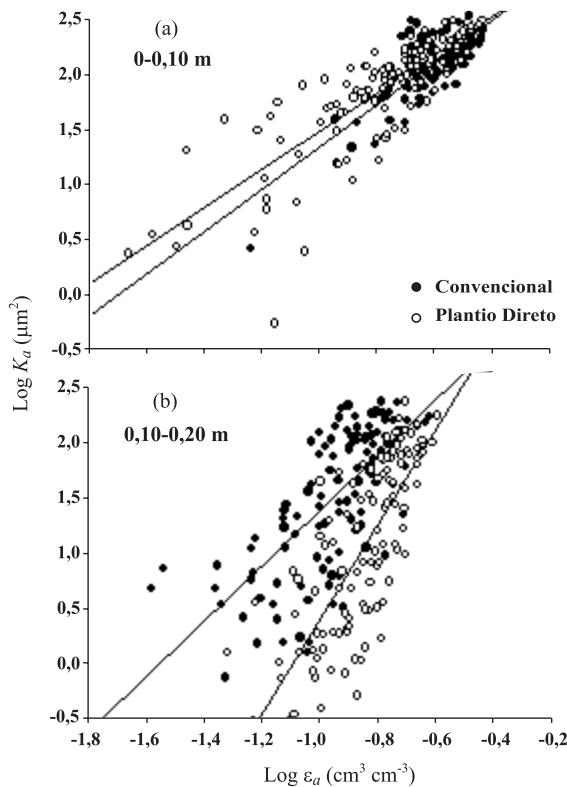


Figura 4. Relação logarítmica entre K_a e ϵ_a de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de preparo do solo e duas profundidades. Os pontos representam os valores em seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa).

Calculado dessa maneira houve uma redução no ajuste dos dados (R^2) (Quadro 5). No entanto, obtido desse modo, o índice N de continuidade foi significativamente diferente nos dois sistemas e nas duas profundidades ($p < 0,05$). O PC continuou apresentando maior N em superfície, porém na camada subsuperficial a continuidade de poros foi significativamente maior no SPD. O volume de poros bloqueados (ϵ_b) estimado com esses novos valores de intercepto (M) e slope (N) seguiram a mesma tendência da estimativa anterior.

CONCLUSÕES

1. Com base na determinação da permeabilidade do solo ao ar (K_a) e na derivação de índices de continuidade de poros (K_l e N), não foi possível comprovar a hipótese de que o SPD resulta na formação de poros mais contínuos.
2. O revolvimento do solo sob PC alterou a porosidade, principalmente a macroporosidade, e o fluxo de ar ocorreu em maior extensão do que no SPD. Assim, o solo sob PC exibiu maior K_a nas duas profundidades avaliadas.
3. A continuidade de poros avaliada pela razão entre K_a e ϵ_a (K_l) não diferiu entre os dois sistemas de manejo para a camada de 0,0–0,10 m, mas foi maior para o PC na profundidade de 0,10–0,20 m.
4. O índice de continuidade N , obtido pela equação de Kozeny-Carman, foi diferente quando determinado

Quadro 5. Parâmetros da regressão do modelo $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$ e porosidade bloqueada, ϵ_b , para o Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem

Profundidade	PC					SPD				
	Log M	N	R ²	ϵ_b	n	Log M	N	R ²	ϵ_b	n
m	% v/v									
0,0 –0,10	3,13	1,84	0,64	1,97	120	2,85	1,32	0,63	0,70	120
0,10–0,20	3,91	2,69	0,62	3,53	120	4,38	4,10	0,66	8,54	120

Valores entre parênteses representam ± 1 erro-padrão da média.

para cada amostra individualmente (n=6) e com base em todas as observações (n=120). Os dois métodos revelaram poros mais contínuos no PC em superfície; contudo, o primeiro não indicou diferença na camada de 0,10–0,20 m, enquanto o segundo resultou em maior continuidade de poros nessa profundidade para o SPD.

LITERATURA CITADA

- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E. & NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:699-702, 1984.
- ANDRÉN, O. & LAGERLÖF, J. Soil fauna (Microarthropods, Enchytraeids, Nematodes) in Swedish agricultural cropping systems. *Acta Agric. Scand.*, 33:33-52, 1983.
- BALL, B.C.; LANG, R.W.; ROBERTSON, E.A.G. & FRANKLIN, M.F. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. *Soil Tillage Res.*, 31:97-118, 1994.
- 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. *J. Soil Sci.*, 39:327-339, 1988.
- BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C. & MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J. Soil Sci.*, 41:215-228, 1990.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. 1358p.
- BOWEN H.D.; AYERS P. & SALYANI, M. Air permeability as an aeration criterion. In: CONFERENCE ASAE, St. Joseph, 1983. *Proceedings...* St. Joseph, ASAE, 1983.
- BRAUNACK, W.A. & DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate sizes on plant growth. *Soil Tillage Res.*, 14:281-98, 1989.
- CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.
- CAVALIERI, K.M.V.; DA SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R. & HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. *Soil Tillage Res.*, 103:158-164, 2009.
- DA SILVA, A.P.; LEO, T.P.; TORMENA, C.A. & GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. *R. Bras. Ci.Solo*. 33:1535-1545, 2009.
- DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F. & CERRI, C.C. Distribution du carbone total et de l'isotope ¹³C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Sci. du Sol*, v.29, p.175-187, 1991.
- DOUGLAS, J.T.; GOSS, M.J. & HILL, D. Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer (¹⁴⁴Ce) technique. *Soil Tillage Res.*, 1:11-18, 1980.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 2006. 306p.
- FEIZA, V.; FEIZIENĖ, D. & KADPIENĖ, G. Agro-physical properties of *Endocalcari-pihypogleyic Cambisol* arable layer in long-term soil management systems. *Pemės Ūkio Mokslai*, 15:13-23, 2008.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. Part 1. p.383-411.
- GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. 1358p.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, 34:101-114, 1984.
- HORNE, D.J. & SOJKA, R.E. Aeration: Tillage effects. In: LAL, R., ed. *Encyclopedia of soil science*. 2.ed. New York, Dekker, 2006. p.36-39.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11:93-99, 1946.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1: p.635-662.
- KROULIK, M.; KUMHALA, F.; HULA, J. & HONZÍK, I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil Tillage Res.*, 105:171-175, 2009.
- LAL, R. Soil management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165:57-72, 2000.
- LIPIEC, J. Soil physical properties and crop growth in relation to soil compaction. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 93:21-30, 1992.
- LIPIEC, J. & GLINSKI, J. Field soil compaction: effects on soil physical properties and stomatal resistance of wheat. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM "SOIL, HUMAN AND ENVIRONMENT INTERACTIONS", Beijing, 1997. *Proceedings...* Beijing, China Science and Technology Press, 1997. p.422-427.
- MCKENZIE, B.M. & DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.*, 65:23-28, 1996.

- 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 Res.*, 25:217-230, 2002.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. & KAY, B.D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Tillage Res.*, 64:125-135, 2002.
- NIELD, D. & BEJAN, A. *Convection in porous media*. 3.ed. New York, Springer, 2006. 643p.
- PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. *Agron. J.*, 54:29-34, 1962.
- POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; SCHJØNNING, P. & HANSEN, J.A. Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency. *Ground Water Monit. R.*, 19:61-70, 1999.
- RYDBERG, T. *Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986*. Uppsala, Division of Soil Management, 1987. 35p. (Report, 76)
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:969-974, 1990.
- STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J. & BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.167-190.
- SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I.K.; MØBERG, J.P.; JONGE, H.; KRISTENSEN, K. & CHRISTENSEN, B.T. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 89:177-198, 1999.
- SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; MOLDRUP, P. & JACOBSEN, O.H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: The long term effects of fertilization and crop rotation. *Europ. J. Soil Sci.*, 53:331-339, 2002.
- SCHJØNNING, P. & RASMUSSEN, K.J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Tillage Res.*, 57:69-82, 2000.
- SAS Institute. *SAS: User's guide: Statistics*. 9.ed. Cary, 2002.