

# **PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO INFLUENCIADAS POR CALAGEM, PREPARO INICIAL E TRÁFEGO<sup>(1)</sup>**

**C. A. TORMENA<sup>(2)</sup>, G. ROLOFF<sup>(3)</sup> & J. C. M. SÁ<sup>(4)</sup>**

## **RESUMO**

**No sistema de plantio direto, a ausência de revolvimento do solo, aliada ao tráfego de máquinas, promove a compactação excessiva do solo em superfície. Com o objetivo de estudar alguns fatores que interferem na compactação do solo em plantio direto, foi realizado um experimento no município de Ponta Grossa (PR), nos anos agrícolas de 1989/1990 e 1990/1991. Comparou-se o efeito de três métodos de preparo inicial do solo - com arado de discos, aivecas e rotativo - e dois níveis de calagem sobre algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso no sistema de plantio direto com tráfego controlado. Utilizou-se a seqüência de culturas em rotação: ervilhaca, milho, aveia-preta e soja. Avaliaram-se a densidade, a porosidade do solo e o teor de água retido entre os potenciais de -0,006 e -0,5 MPa. Não houve efeito significativo da calagem sobre as propriedades físicas estudadas. Os resultados demonstraram efeitos significativos do tráfego, aumentando a densidade do solo e reduzindo a sua porosidade e o conteúdo de água retido entre aqueles potenciais. A distribuição, em profundidade, das cargas aplicadas pelo tráfego de máquinas, principalmente de colheitadeiras, foi, provavelmente, influenciada pelo volume de solo revolvido pelos diferentes sistemas de preparo inicial. Nas parcelas em que a estrutura do solo foi submetida a pressões por meio do tráfego, obteve-se redução na produtividade da soja, em comparação às áreas com ausência de tráfego, no período em que o estudo foi realizado.**

**Termos de indexação: rotação de culturas, estrutura do solo, compactação, densidade do solo, porosidade.**

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal do Paraná. Trabalho apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Goiânia (GO). Recebido para publicação em abril de 1997 e aprovado em abril de 1998. Pesquisa executada com o apoio da Fundação ABC de Apoio à Pesquisa.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá. CEP 87020-900 Maringá (PR).

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos, Universidade Federal do Paraná. CEP 80001-900 Curitiba (PR).

<sup>(4)</sup> Professor Assistente do Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa. CEP 84010-330 Ponta Grossa (PR).

**SUMMARY: SOIL PHYSICAL PROPERTIES IN NO-TILLAGE INFLUENCED BY LIMING, PREVIOUS TILLAGE AND TRAFFIC**

*In the no-tillage system, the absence of soil revolving, combined with the traffic of machines, promotes excessive soil surface compaction. An experiment was conducted in the county of Ponta Grossa, State of Paraná, Brazil, during the agricultural years of 1989/1990 and 1990/1991, with the objective of studying several factors that intervene in this process. This research compared the effects of three previous soil tillage methods and two liming levels on several physical properties of a clayey Dark Red Latosol under a no-tillage system and controlled traffic. Soil bulk density, soil porosity, and water retention between the potentials of -0.006 and -0.5 MPa were evaluated. Results showed significant effects of traffic increasing soil density and reducing soil porosity and water content retained between the above mentioned potentials. There was no significant effect of liming on the studied properties. The in-depth distribution of the load applied by the traffic of machines, mainly harvesters, seemed to be influenced by the soil volume revolved by the different soil initial tillage systems. Soil structure was modified by the traffic of machines, altering soil quality and reducing soybean yield, when compared to areas with absence of traffic.*

*Index terms: crop rotation, soil structure, compaction, soil density, porosity.*

## INTRODUÇÃO

O plantio direto é uma técnica eficiente no controle das perdas de solo e água, razão por que, juntamente com outras vantagens que o sistema oferece, tem sido adotado por um número cada vez maior de agricultores. No entanto, apesar das inúmeras vantagens, alguns fatores têm causado frustrações com a adoção dessa tecnologia, motivando o retorno ao sistema convencional de preparo do solo. Dentre estes, destaca-se a excessiva compactação do solo em superfície, decorrente da ausência de revolvimento do solo e da ocorrência sistemática do tráfego de máquinas e implementos.

Os diferentes mecanismos de mobilização do solo alteram sua estrutura e seus atributos físicos, em virtude do grau e intensidade de mobilização (Shaffer & Johnson, 1982). No sistema de plantio direto, a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na superfície do solo. Resultados demonstram que cerca de 80-90% da compactação potencial ocorre logo após as primeiras entradas de máquinas na área (Meek et al., 1988; Blackwell et al., 1989). Com isso, as modificações na estrutura do solo podem levar à redução no conteúdo de água disponível e/ou má aeração (Voorhees, 1983), com consequência direta sobre a produtividade das culturas. Segundo Lal et al. (1989), a compactação em sistemas de mínima movimentação do solo pode contribuir parcialmente com as possíveis reduções de produtividade das culturas nesse sistema.

A compactação altera as propriedades físicas do solo, geralmente com aumento na densidade, redução

na porosidade total e na porosidade de aeração (Kayombo & Lal, 1986; Carter, 1990). O efeito da compactação sobre a porosidade e densidade é maior na superfície do solo (Allmaras et al., 1982) e pode levar à redução na capacidade de retenção e no conteúdo de água disponível. Também sob condições compactadas há menor número de sítios com adequada aeração (Currie, 1984), sendo comum a ocorrência de baixa difusão de oxigênio no solo sob condições de umidade elevada.

A qualidade do ambiente radicular é caracterizada pelos tamanhos dos poros e pela sua distribuição no solo. A classificação dos poros em tamanhos e suas relações de funcionalidade no contexto solo-água-planta são bem conhecidas na literatura, e especialmente documentadas por Hamblin (1985) e Dexter (1988). A porosidade de aeração destaca-se como uma das propriedades mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas. Observa-se que valores de porosidade de aeração inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  têm limitado o crescimento radicular (Vomocil & Flocker, 1966), apesar de tal limite depender também do tipo de planta e do nível de atividade biológica do solo (Gupta et al., 1989). Além disso, o fornecimento de oxigênio às raízes depende de fatores complexos, incluindo tortuosidade, continuidade e distância entre poros ocupados com ar (Dexter, 1988). Em solos severamente compactados, sob condições de elevada umidade, a aeração insuficiente é um dos fatores que limitam o crescimento radicular (Boone et al., 1986); o acúmulo de raízes na superfície, por ocupar parte do espaço poroso, pode também reduzir a taxa de difusão de oxigênio no solo (Asady & Smucker, 1989).

Para caracterizar os efeitos da compactação sobre a estrutura do solo, destacando-se, dentre eles, a densidade e a porosidade do solo, várias propriedades têm sido utilizadas. Dessa forma, considerando as vantagens técnicas e econômicas dos sistemas com mínima movimentação do solo no ambiente tropical, torna-se relevante estudar os mecanismos envolvidos nas alterações físicas do solo nesses sistemas.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os fatores que interferem na compactação e nas modificações em algumas propriedades físicas, partindo do condicionamento estrutural do solo, antes da implantação do sistema de plantio direto, adotando diferentes níveis de calagem e intensidades de revolvimento e desenvolvendo a área experimental com tráfego controlado.

**MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, localizado na Estação Experimental da Cooperativa Batavo, município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, sendo a área representativa da região dos Campos Gerais. O clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Koeppen (Godoy et al., 1976). As características granulométricas e químicas de seis camadas do solo estudado encontram-se no quadro 1. Antes da implantação do experimento, a área foi explorada com culturas anuais, utilizando o preparo convencional do solo.

O experimento constou dos seguintes tratamentos: preparo inicial do solo com arado de discos, aivecas e rotativo, nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,60 m, respectivamente; dose de calcário para atingir 70% de saturação do complexo de troca e sem adição de calcário; e faixas com e sem tráfego cumulativo das rodas de trator e colheitadeira durante o experimento. A parcela útil apresentava dimensões de 10 m de largura por 20 m de comprimento, distribuídas em blocos casualizados com três repetições de cada tratamento, perfazendo um total de 36 parcelas. O arado rotativo constou de um equipamento com hastes rotativas, adaptado para revolver o solo até a profundidade de 0,60 m. Tal equipamento tem sido utilizado, na região deste estudo, para a incorporação profunda de fertilizantes e corretivos nas linhas de plantio de várias espécies frutíferas.

Em todas as parcelas, foi aplicado fertilizante fosfatado (termofosfato), numa dosagem para atingir 15 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo disponível no solo, e que, juntamente com o calcário, foi incorporado por ocasião da realização do preparo inicial do solo. Posteriormente, o controle do tráfego foi feito em todas as parcelas, a partir da semeadura da primeira cultura, obtendo-se, assim, faixas com e sem tráfego. O tráfego foi orientado por marcações permanentes, indicando o centro de cada parcela. As diferenças de bitola entre trator e colheitadeira foram contornadas, fazendo com que o tráfego fosse cumulativo por meio de apenas um dos rodados, onde foram realizadas as amostragens na área trafegada.

Após o preparo inicial do solo, foi realizada uma gradagem leve, bem como executada a semeadura da primeira cultura da rotação: ervilhaca (1989); milho (1989/1990); aveia-preta (1990) e soja (1990/

**Quadro 1. Características granulométricas e químicas de seis camadas do Latossolo Vermelho-Escuro antes da implantação do experimento**

| Característica <sup>(1)</sup>  | Camada (m) |             |             |             |             |             |
|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|  | 0 - 0,10   | 0,10 - 0,20 | 0,20 - 0,30 | 0,30 - 0,40 | 0,40 - 0,50 | 0,50 - 0,60 |
| Areia, g kg <sup>-1</sup>  | 380        | 366         | 350         | 345         | 343         | 348         |
| Silte, g kg <sup>-1</sup>  | 142        | 143         | 143         | 133         | 111         | 108         |
| Argila, g kg <sup>-1</sup>   | 478        | 491         | 507         | 522         | 546         | 544         |
| pH (CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup> )                         | 5,2        | 4,9         | 4,6         | 4,6         | 4,7         | 4,8         |
| Al <sup>3+</sup> , mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                    | 0          | 1           | 5           | 4           | 2           | 1           |
| H + Al, mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                               | 55         | 62          | 56          | 55          | 52          | 48          |
| Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> , mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 47         | 19          | 14          | 13          | 14          | 15          |
| Ca <sup>2+</sup> , mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                    | 31         | 19          | 7           | 7           | 8           | 9           |
| K <sup>+</sup> , mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                      | 4          | 2,3         | 0,8         | 0,5         | 0,4         | 0,3         |
| P, mg dm <sup>-3</sup>   | 9,5        | 3           | 0,9         | 0,5         | 0,1         | 0,1         |
| C, g kg <sup>-1</sup>  | 22         | 22          | 20          | 15          | 15          | 13          |

<sup>(1)</sup> Analisadas conforme métodos da EMBRAPA (1979).

1991). O controle de plantas daninhas, pragas e doenças foi feito por métodos químicos convencionais. As colheitas das culturas de milho e soja foram realizadas mecanicamente através de colheitadeira com 3/4 da carga total, equipada com picador e distribuidor de palha.

Em cada parcela, foram retiradas amostras com estrutura indeformada na parte central das camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,35 e 0,35-0,60 m, após os tráfegos de colheitadeira ocorridos na colheita da cultura do milho (março de 1990) e soja (maio de 1991). Essas amostragens foram feitas nas entrelinhas com e sem tráfego de cada tratamento, por introdução lenta de um amostrador e anéis volumétricos com macaco hidráulico, utilizando um veículo leve como contrapeso. Os anéis que continham as amostras indeformadas foram acondicionados em papel alumínio e sacos plásticos e armazenados sob temperatura de  $\pm 5^\circ\text{C}$ , para minimizar a atividade biológica e perda de água das amostras até serem processadas.

Inicialmente, as amostras foram saturadas em ambiente a vácuo, por duas horas, e, posteriormente, mantidas, por vinte e quatro horas, numa bandeja com uma lâmina de água cobrindo cerca de 2/3 de sua altura, para que a saturação fosse a mais completa possível. Em seguida, as amostras foram submetidas ao potencial de  $-0,006\text{ MPa}$  em uma mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979), e  $-0,50\text{ MPa}$  numa câmara de pressão de Richards, conforme procedimento descrito por Klute (1986). Na seqüência, foi determinada a massa do solo seco em estufa a  $105-110^\circ\text{C}$ .

A densidade de partículas do solo foi determinada pelo método do balão volumétrico e álcool etílico, de acordo com EMBRAPA (1979); a densidade do solo, pela relação entre a massa do solo seco a  $105-110^\circ\text{C}$  e o volume da amostra considerado igual ao volume do cilindro amostrador (Blake & Hartge, 1986), e a porosidade total foi obtida a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (Danielson & Sutherland, 1986). O volume de microporos foi considerado como o conteúdo volumétrico de água retido no potencial de  $-0,006\text{ MPa}$ , e a porosidade de aeração, como a diferença entre a porosidade total do solo, calculada na base de volume, e o volume de microporos. O conteúdo de água disponível foi determinado pela diferença entre os conteúdos de água do solo nos potenciais de  $-0,006$  e  $-0,5\text{ MPa}$ . Partiu-se do critério de que o volume de água retido entre esses potenciais está mais relacionado com as alterações na estrutura do solo decorrentes dos tratamentos, os quais interferem de imediato na fração dos poros de maior diâmetro.

Os resultados foram analisados, utilizando o programa estatístico Systat (Wilkinson, 1987), sendo as comparações entre os tratamentos realizadas por profundidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância da densidade do solo, obtida na amostragem realizada em março de 1990, demonstrou efeitos do tráfego até a profundidade de  $0,35\text{ m}$  e efeitos do preparo na profundidade de  $0,60\text{ m}$ , em função do revolvimento causado pelo arado rotativo que atuou nessa profundidade (Figura 1a). Não houve efeito, estatisticamente significativo, da calagem sobre as propriedades físicas estudadas, de forma que os dados obtidos nas áreas com e sem calagem foram incorporados numa única informação.

O tráfego aumentou a densidade do solo até a profundidade de  $0,20\text{ m}$ , para os preparos com arado de discos e aivecas, e nas profundidades de  $0,35$  e  $0,60\text{ m}$ , para o preparo com arado rotativo (Figura 1a), porém com magnitudes bem inferiores àquelas das camadas superficiais. Os efeitos do tráfego no

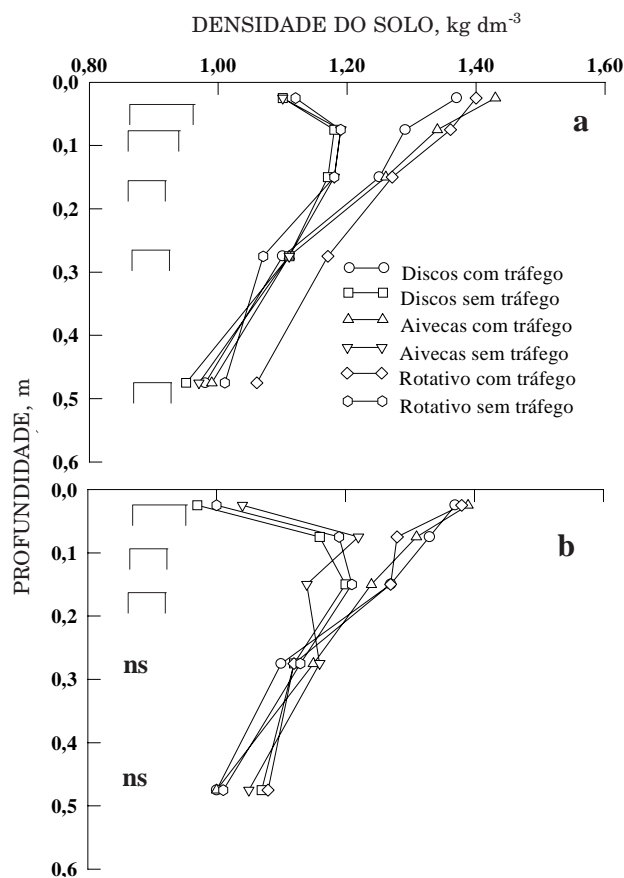


Figura 1. Densidade do solo determinada nas coletas realizadas em março de 1990 (a) e maio de 1991 (b). (As barras horizontais indicam as diferenças mínimas significativas entre os tratamentos obtidas pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) e *ns* indica ausência de diferenças entre os tratamentos).



aumento da densidade do solo também têm sido demonstrados por outros autores (Voorhees & Lindstrom, 1983), principalmente em superfície. O efeito significativo do tráfego até a profundidade de 0,60 m sobre o tratamento de preparo inicial com arado rotativo, em comparação com os outros dois métodos de preparo inicial utilizados, pode ser atribuído à ausência de confinamento do perfil devido à completa remoção das camadas compactadas existentes em subsuperfície e, dessa forma, parte importante das cargas aplicadas foi distribuída mais profundamente.

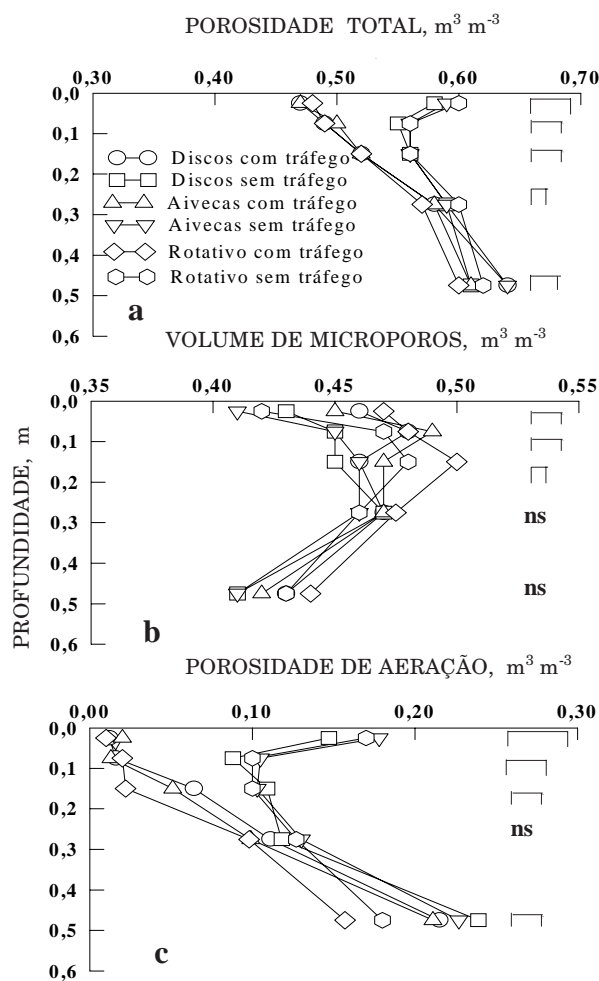
A análise de variância não mostrou efeitos dos sistemas de preparo inicial do solo até a profundidade de 0,20 m. É possível que a presença de camadas compactadas no interior do perfil tenha influenciado a transmissão de cargas em profundidade, em virtude do efeito de confinamento causado por tais camadas. Isto significa que os possíveis efeitos do revolvimento sobre a densidade do solo foram eliminados pelo tráfego e, segundo Voorhees & Lindstrom (1983), isto ocorre em função das magnitudes de cargas aplicadas pelas máquinas.

Na amostragem realizada em maio de 1991 (Figura 1b), após o segundo tráfego de colheitadeira, também ocorreram efeitos do tráfego sobre a densidade do solo até a profundidade de 0,20 m. As densidades médias foram de 1,37, 1,34 e 1,26 kg dm<sup>-3</sup>, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Nos tratamentos sem tráfego, não houve diferenças entre os métodos de preparo, indicando que ocorreu recuperação na estrutura do solo semelhante para as diferentes formas de mobilização inicial do solo. Isto pode ser atribuído à atuação do sistema radicular das culturas e aos ciclos de secagem e umedecimento intensificados com a demanda hídrica das plantas. Em comparação com a amostragem realizada em março de 1990, percebeu-se a redução nos valores de densidade do solo nos tratamentos sem tráfego. Possivelmente, tais resultados são reflexos da atuação da cultura da aveia que antecedeu a soja, promovendo maior agregação e conseqüente redução da densidade do solo.

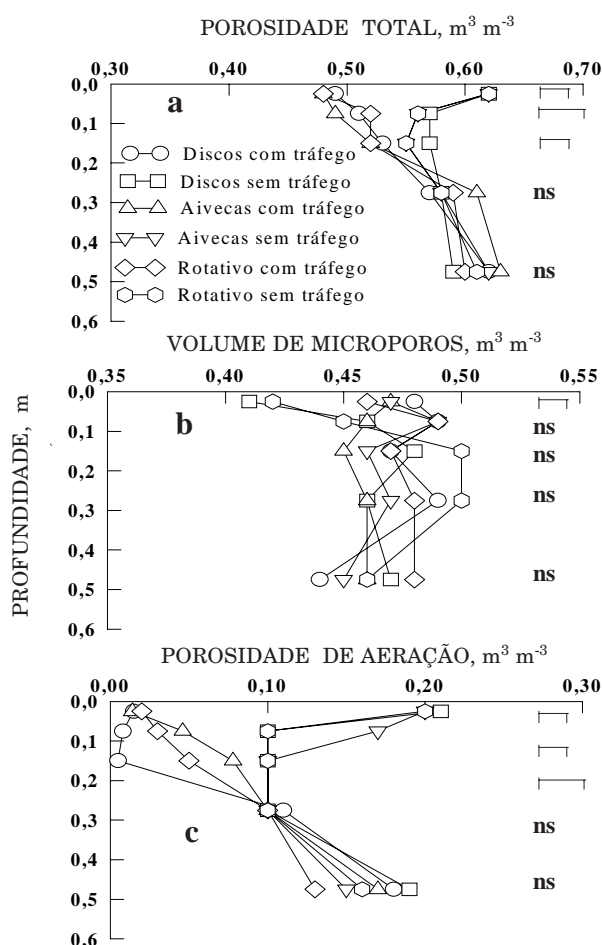
As figuras 2 e 3 mostram os resultados da porosidade do solo nas amostragens realizadas em março de 1990 e maio de 1991, respectivamente. Com relação à camada de 0-0,05 m, o tráfego foi determinante na sua alteração. Não houve efeito estatisticamente significativo dos métodos de preparo inicial do solo. Na coleta realizada em março de 1990, o tráfego reduziu, em média, 24 e 91% o volume de poros totais e da porosidade de aeração, respectivamente, em comparação com a área não trafegada, enquanto o volume de microporos teve um acréscimo médio de 10%. A porosidade de aeração foi reduzida para valores próximos de zero e, conseqüentemente, teve implicações nos

processos de difusão gasosa e movimento da água, uma vez que os macroporos são importantes para o rápido fluxo de ar e de água no solo (Culley et al., 1987).

De acordo com Vomocil & Flocker (1966), taxas aceitáveis de difusão gasosa ocorrem, quando a porosidade de aeração situa-se acima de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Tomando como base esse valor, pode-se prever que o tráfego de máquinas pesadas implicará a ocorrência de sítios anaeróbicos, sob condições mais úmidas, podendo resultar numa redução da eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados no solo, bem como na produtividade das culturas.



Na amostragem realizada em maio de 1991, a porosidade de aeração foi reduzida, em média, 91% na entrelinha trafegada, comparada àquela sem tráfego. Os prováveis macroporos criados pelo sistema radicular das culturas e mesofauna do solo foram eliminados pelo tráfego da colheitadeira. Os valores médios de porosidade de aeração foram de 0,01 e 0,014  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , na área com tráfego, e de 0,165 e 0,203  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , na área sem tráfego, nas amostragens realizadas em março de 1990 e maio de 1991, respectivamente. A comparação entre as duas épocas de amostragens revelou o aumento na porosidade total e na porosidade de aeração na entrelinha trafegada, podendo ser resultante da atuação do sistema radicular da cultura da aveia que antecedeu a soja sobre a estrutura do solo.



**Figura 3. Porosidade total (a), volume de microporos (b) e porosidade de aeração (c) do solo obtidos na amostragem realizada em maio de 1991. (As barras horizontais indicam as diferenças mínimas significativas entre os tratamentos obtidas pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) e ns indica ausência de diferenças entre os tratamentos).**

Na camada de 0,05-0,10 m, houve efeito significativo do tráfego sobre a porosidade do solo. Ocorreram reduções médias de 11 e 88%, e de 26 e 28% na porosidade total e porosidade de aeração, nas amostragens realizadas em março de 1990 e maio de 1991, respectivamente, e um aumento de 5% no volume de microporos na área trafegada (Figuras 2 e 3). Os macroporos foram facilmente destruídos com a aplicação de cargas sobre o solo, principalmente após a aplicação do primeiro tráfego pesado, o que responde, em grande parte, pelas alterações da porosidade nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m. Esta condição tende a permanecer no tempo, uma vez que a compactação modifica o volume de poros interagregados, ao passo que a porosidade de intra-agregados não é alterada (Currie, 1984). O tráfego reduziu, em média, 6% a porosidade total e em 36% a porosidade de aeração na amostragem realizada em março de 1990. Na amostragem realizada em maio de 1991, percebeu-se redução média de 6%, na porosidade total; de 24%, na porosidade de aeração pelo tráfego, e nenhum efeito dos tratamentos sobre a microporosidade.

Na camada de 0,10-0,20 m, o tráfego também atuou na redução da porosidade total e da porosidade de aeração na duas amostragens. Entre as coletas, no tratamento de preparo inicial com arado rotativo, houve um acréscimo de 10%, em média, na microporosidade, nas áreas com e sem tráfego, significando que os efeitos do tráfego e do adensamento natural do solo foram equivalentes nessa profundidade. Em geral, o valor médio da porosidade de aeração na área trafegada foi de 0,0345  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , ainda bem abaixo do limite crítico. Nas amostragens realizadas em março/90 e maio/91, os menores valores de porosidade de aeração ocorreram nas entrelinhas com tráfego dos preparo com arado rotativo e arado de discos, respectivamente. O efeito do tráfego nas modificações da porosidade de aeração até essa profundidade tem sido demonstrado por Carter (1988) e Gupta et al. (1989) e é indicativo de reduções na qualidade física do solo para o crescimento das plantas. Não houve diferenças estatisticamente significativas entre as duas épocas de amostragem (dados não apresentados). Segundo os resultados, houve redução na porosidade de aeração com o tempo (Figuras 2c e 3c), com tendência a ser maior na entrelinha trafegada, o que pode ser resultado do acúmulo de tráfego nestas áreas.

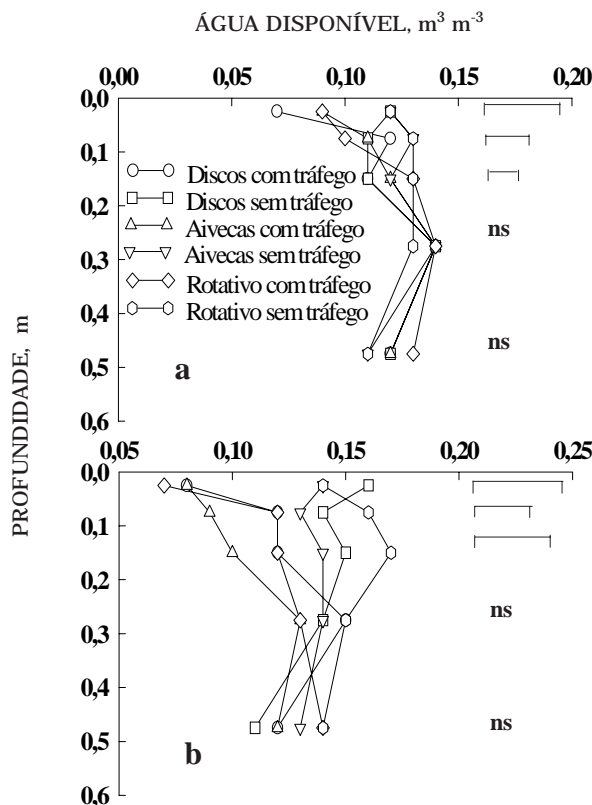
Nas camadas de 0,20-0,35 e 0,35-0,60 m, ocorreram efeitos significativos do tráfego sobre a porosidade total no preparo com arado rotativo, na coleta realizada em março de 1990 (Figura 2a), e sobre a porosidade de aeração, na camada de 0,35-0,60 m. O revolvimento em profundidade, numa provável condição de menor estabilidade e resistência dos agregados, promoveu redução no volume dos poros de maior diâmetro. Além disso, a maior probabilidade de distribuição das cargas, em profundidade, devida à remoção de camadas adensadas no interior do

perfil, também contribuiu para a redução na porosidade de aeração no sistema de preparo rotativo. Na amostragem realizada em maio de 1991, não foi constatado efeito dos tratamentos na porosidade do solo em tais profundidades.

O conteúdo de água disponível (CAD) reflete as alterações na estrutura do solo em virtude das alterações do espaço poroso, que atua na retenção de água em potenciais mais elevados e, portanto, mais facilmente disponível às plantas. O tráfego reduziu significativamente os valores do CAD, em ambas as amostragens, até a profundidade de 0,10-0,20 m (Figuras 4a e 4b). Na amostragem realizada em março de 1990, o tráfego reduziu em 50 e 20% o CAD, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente; na profundidade de 0,10-0,20 m, o preparo inicial com arado de discos resultou em menor CAD, provavelmente associado à maior compactação do solo nesta profundidade. Nas profundidades de 0,20-0,35 e 0,35-0,60 m, não houve efeitos estatisticamente significativos dos tratamentos, o que pode ser atribuído à grande variabilidade dos resultados obtidos. Os efeitos do tráfego na redução do CAD estão associados à redução na porosidade total do solo, como constatado anteriormente.

Os resultados obtidos na avaliação da porosidade e do CAD demonstram modificações dinâmicas dessas propriedades nas áreas trafegadas. Já nas áreas não trafegadas, percebeu-se evidente estabilização das condições físicas do solo, em consequência da recuperação e estabilização da estrutura, bem como da persistência dessa condição ao longo tempo.

De forma geral, os resultados evidenciam que os preparos iniciais com arado de discos e aivecas proporcionaram maior compactação em superfície, o que pode ser atribuído ao efeito de confinamento do perfil por camadas compactadas em subsuperfície. Esses resultados indicam que a remoção ou não de camadas compactadas, resultantes de manejos anteriores, pode determinar o grau de compactação na superfície do solo e impor limitações em sua produtividade sob sistemas de mínima mobilização do solo. Levando em conta que a compactação no sistema de plantio direto é inevitável, a longo prazo, a concentração da compactação em superfície pode ser benéfica, considerando-se que sua remoção futura é mais prática e econômica. A desvantagem pode ser o período de tempo, necessariamente mais curto, entre a instalação do plantio direto e o possível revolvimento do solo para eliminar esses efeitos. Os resultados aqui apresentados não permitem concluir, ainda, qual sistema de preparo é o mais adequado, mas fornecem algumas indicações do comportamento do solo sob diferentes sistemas de mobilização inicial, antes de se introduzir o sistema de plantio direto.



**Figura 4. Conteúdo de água disponível entre os potenciais de -0,006 e -0,5 MPa das amostragens realizadas em março de 1990 (a) e maio de 1991 (b). (As barras horizontais indicam as diferenças mínimas significativas entre os tratamentos obtidas pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) e ns indica ausência de diferenças entre os tratamentos).**

A produtividade da cultura da soja demonstra bem o efeito da degradação estrutural pelo tráfego no preparo inicial com arado de discos, em comparação aos outros métodos de mobilização do solo (Quadro 2). A análise de variância não mostrou efeito significativo dos tratamentos sobre a produtividade do milho, provavelmente pelos efeitos associados ao clima, correção e fertilização do solo no início do experimento, além de que, até a introdução da cultura do milho, as cargas aplicadas ao solo foram de pequenas magnitudes. Para a cultura da soja, houve efeito significativo do tráfego no preparo inicial com arado de discos, com redução de cerca de 23% na produtividade, indicando que as alterações produzidas no ambiente radicular foram prejudiciais ao desempenho da cultura, por torná-la mais sensível às variações climáticas nessa condição. Nos sistemas de preparo com aivecas e rotativo, na presença do tráfego, não houve diferenças estatisticamente significativas na produtividade da

**Quadro 2. Resultados de produtividade das culturas de milho e soja nos diferentes tratamentos de preparo e tráfego**

| Cultura | Preparo inicial do solo | Produtividade      |             |
|---------|-------------------------|--------------------|-------------|
|         |                         | Com tráfego        | Sem tráfego |
|         |                         | t ha <sup>-1</sup> |             |
| Milho   | Disco a 0,20 m          | 10,381 a           |             |
|         | Aiveca a 0,35 m         | 9,835 a            |             |
|         | Rotativo a 0,60 m       | 9,355 a            |             |
| Soja    | Disco a 0,20 m          | 3,235 Aa           | 4,180 Ba    |
|         | Aiveca a 0,35 m         | 4,042 Ab           | 4,027 Aa    |
|         | Rotativo a 0,60 m       | 3,832 Ab           | 3,898 Aa    |

Obs.: Médias seguidas de letras diferentes, maiúsculas, na horizontal, e minúsculas, na vertical, indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (p < 0,01).

cultura da soja, o que pode ser atribuído aos níveis de alteração similares no ambiente radicular, os quais foram possíveis de ser integrados pela cultura durante as diferentes fases de crescimento. Já na ausência do tráfego, os sistemas comportaram-se similarmente, estando a menor produtividade no sistema rotativo relacionada com as condições químicas do solo, resultante da mistura dos horizontes superficiais com os subsuperficiais, quimicamente menos favoráveis. Segundo os resultados, as culturas responderam às alterações físicas no ambiente radicular, reagindo aos efeitos dos tratamentos aplicados.

## CONCLUSÕES

1. O tráfego foi o principal fator na alteração das propriedades físicas do solo em estudo.
2. A calagem não afetou, significativamente, nenhuma das propriedades físicas avaliadas.
3. A compactação pelo tráfego de máquinas reduziu a porosidade de aeração para valores abaixo do limite crítico de 0,1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.
4. Na ausência do tráfego, as modificações na estrutura do solo foram semelhantes entre os tratamentos.

## LITERATURA CITADA

ALLMARAS, R.R.; WARD, K.; DOUGLAS, C.L. & EKIN, L.G. Long term cultivation effect on hydraulic properties of Walla-Walla silt loam. *Soil Till. Res.*, 2:265-279, 1982.

ASADY, G.H. & SMUCKER, A.J.M. Compaction and root modification of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:251-254, 1989.

BLACKWELL, P.S.; JAYAWARDANE, N.S.; BLACKWELL, J.; WHITE, R. & HORN, R. Evaluation of soil compaction by transverse wheeling of tillage slots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:11-15, 1989.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.363-375.

BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAG, B.A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. 2. Soil conditions and plant growth. *Neth. J. Agri. Sci.*, 35:113-128, 1986.

CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil Till. Res.*, 12:37-51, 1988.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loam. *Can. J. Soil Sci.*, 70:425-433, 1990.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. & RANDALL, G.W. Physical properties of a typical Haplaquol under tillage and no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1587-1593, 1987.

CURRIE, J.A. Gas diffusion through soil crumbs: The effects of compaction and wetting. *J. Soil Sci.*, 35:1-10, 1984.

DANIELSON, R.E., & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.443-461.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.*, 11:199-238, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979. não paginado.

GODOY, H.; CORREA, A.R. & SANTOS, D. Clima do Paraná. In: IAPAR: Manual agropecuário para o Paraná. Londrina, Fundação Instituto Agronômico do Paraná, 1976. p.17-37.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P. & De FRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. *Adv. Agron.*, 42:331-338, 1989.

HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-152, 1985.

KAYOMBO, B. & LAL, R. Effects of soil compaction by rolling on soil structure and development of maize in no-till and disc ploughing systems on a Tropical Alfisol. *Soil Till. Res.*, 7:117-134, 1986.

KIEHL, E.J. Porosidade. In: KIEHL, E.J. *Manual de Edafologia: relações solo-planta*. São Paulo, Ceres, 1979. p.96-111.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-662.



- LAL, R.; LOGAN, T.J. & FAUSEY, N.R. Long term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained Mollic Ocharaqualf in Northwest Ohio. I. Soil physical properties, root distribution and grain yield of corn and soybean. *Soil Till. Res.*, 14:341-355, 1989.
- MEEK, B.D.; RECHEL, E.A.; CARTER, L.M. & DETAR, W.R. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone productions systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:233-236, 1988.
- SHAFFER, R.L. & JOHNSON, C.E. Changing soil condition: The dynamic of tillage. In: PREDICTING TILLAGE EFFECTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND PROCESSES. Proceedings. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p.151-178.
- VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effects of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 4:242-246, 1966.
- VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviation wheel induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:129-133, 1983.
- VOORHEES, W.B. & LINDSTROM, M. J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. *J. Soil Water Conserv.*, 38:307-311, 1983.
- WILKINSON, L. *Systat: the system for statistics*. Evanston, Systat Inc., 1987. não paginado.