

Comparação de métodos de medida da densidade do solo

Luiz Fernando Pires^{1*}, Jadir Aparecido Rosa² e Luís Carlos Timm³

¹Laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais, Departamento de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. Carlos Cavalcanti, 4748, 84030-000, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ²Instituto Agrônomo do Paraná, Pólo Regional de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ³Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, Rio Grande do Sul, Brasil. *Autor para correspondência: E-mails: luizfpires@gmail.com; lfpres@uepg.br

RESUMO. A densidade do solo (d_s) tem sido usada como um parâmetro importante de caracterização física da estrutura do solo e como um indicador de sua compactação. Este trabalho teve como objetivo comparar os valores de d_s obtidos através de métodos convencionais, como torrão parafinado (MTP) e anel volumétrico (MAV), e nucleares, como tomografia computadorizada (MTC), atenuação gama (MAG) e sonda de superfície nêutron-gama (MSN). Foram feitas coletas de amostras em áreas submetidas às práticas de manejo de plantio convencional e plantio direto. Para as análises pelos MAV, MTP, MTC e MAG foram coletadas 16 amostras na camada superficial do solo e para o MSN foram realizadas leituras em 16 pontos distintos ao longo da área experimental. Os maiores valores de d_s foram obtidos para os MTP, MTC e MAG (plantio convencional) não diferindo estatisticamente entre si. Os menores valores de d_s foram obtidos para os MSN e MAV não diferindo estatisticamente entre si. Com relação ao plantio direto foram comparados somente os MAV e MAG com os valores de d_s diferindo estatisticamente entre si.

Palavras-chave: propriedades físicas do solo, sonda de superfície nêutron-gama, atenuação de raios gama, anel volumétrico, torrão parafinado, tomografia computadorizada.

ABSTRACT. Comparison of methods to evaluate soil bulk density. Soil bulk density (d_s) is traditionally used as an indicator of soil structure and soil compaction. The objective of this work was to compare d_s values obtained through conventional methods like paraffin sealed clod (MTP) and volumetric ring (MAV), and nuclear methods like computerized tomography (MTC), gamma-ray attenuation (MAG) and neutron-gamma surface gauge (MSN). Soil samples were collected in areas under conventional tillage and no-tillage systems. Sixteen samples were collected in the soil surface layer for the analyses by the MAV, MTP, MTC, and MAG. For the MSN, sixteen readings were carried out throughout the experimental area. The highest d_s values for the conventional tillage system were obtained for the MTP, MPC, and MAG, without significant differences. Also the statistic test indicates that the lowest d_s values obtained for the MSN and MAV did not differ significantly. Regarding to the no-tillage system, only the MAV and MAG had been compared, whose d_s values did differ significantly.

Keywords: soil physics properties, neutron-gamma surface gauge, gamma-ray attenuation, volumetric ring, paraffin sealed clods, computerized tomography.

Introdução

Nos últimos anos, a deterioração da qualidade do solo tem sido um tópico importante na ciência do solo, na medida em que a retirada da cobertura vegetal e o uso intensivo da mecanização em todas as operações de cultivo do solo (semeadura, tratos culturais e colheita) podem resultar na diminuição da sua capacidade produtiva (ASSIS; LANÇAS, 2005). Assim, o monitoramento da qualidade do solo é necessário e pode ser realizado mediante a avaliação dos seus atributos físicos, os quais são importantes para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A densidade do solo (d_s) tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros

atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica etc. (COSTA et al., 2007; DAM et al., 2005; MARTINS et al., 2009; THIMÓTEO et al., 2001).

Reichardt e Timm (2008) salientam ainda que a d_s possa ser usada como um índice do grau de compactação de um solo. Como o solo é um material poroso, por compressão a mesma massa pode ocupar um volume menor. Isto afeta a sua estrutura, o arranjo e volume dos poros e as características de retenção de água.

A variabilidade espacial da d_s é altamente afetada pelo manejo agrícola, pelo tipo de solo e pela profundidade de amostragem. O número de

amostras necessárias para determinação da d_s é dúvida comum entre pesquisadores. Ao se coletar amostras de solo, a variabilidade dos resultados é atribuída, habitualmente, a erros de metodologia na amostragem e a sua heterogeneidade, em profundidade e no sentido horizontal. Logo, torna-se difícil identificar e separar a interferência de cada um desses fatores; entretanto, a experiência tem indicado que se a amostragem for feita cuidadosamente, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo. Portanto, quanto mais heterogêneo o solo, maior o número de amostras necessárias. Por isso, vários métodos de determinação da d_s têm sido desenvolvidos para facilitar estas amostragens, possibilitando a redução do número de amostras necessárias e do custo de execução do esforço amostral para o planejamento de sistemas de uso e manejo do solo. Isto é particularmente importante nos estudos de variabilidade espacial de atributos físicos do solo (TIMM et al., 2006; WARRICK; NIELSEN, 1980).

Dentre os métodos de determinação da densidade do solo, o de maior utilização e considerado padrão, é o do anel volumétrico (MAV), o qual consiste na amostragem de solo com estrutura indeformada num anel (cilindro metálico) de volume conhecido. Um aspecto importante refere-se à amostragem. Na retirada do anel volumétrico, deve-se tomar o cuidado para não compactar a amostra e para preencher todo o espaço do anel com solo. A descrição detalhada do MAV pode ser encontrada em Embrapa (1997). Outro método utilizado, o do torrão parafinado (MTP), consiste na coleta de torrões de volume variável, secos ao ar, e impermeabilizados com parafina líquida. O volume dos torrões é determinado pelo volume de água deslocado pelos mesmos quando imersos em água (REICHARDT; TIMM, 2008). Vantagens e desvantagens desses métodos são discutidos em Blake e Hartge (1986) e Silva et al. (2000).

Os métodos mais modernos de determinação da densidade do solo baseiam-se em técnicas nucleares. Entre estas técnicas, a tomografia computadorizada (MTC) tem sido utilizada há mais de duas décadas principalmente em estudos de compactação do solo e seus efeitos na produção agrícola e degradação do solo (PIRES et al., 2010; TIMM et al., 2005). O MTC permite a determinação dos valores médios de parâmetros físicos do solo e a identificação e localização exata da ocorrência de heterogeneidade (gradiente de densidade ou de umidade).

Vaz et al. (1989), utilizando um tomógrafo de resolução milimétrica no estudo da compactação de solos causada pela ação de máquinas agrícolas,

detectaram pequenas variações na densidade em camadas da ordem de milímetros. A aplicação dessa técnica na determinação da umidade e densidade do solo simultaneamente mostrou-se bastante satisfatória. O MTC tem sido particularmente eficiente na determinação e avaliação de parâmetros físicos de solos de várzea, onde o uso das técnicas convencionais de determinação de d_s é limitado (PEDROTTI et al., 2003, 2005).

Outro método de determinação de d_s baseado em técnicas nucleares é a utilização de sondas de superfície nêutron-gama (MSN), as quais são empregadas para medidas de d_s para camadas de até no máximo, 0,30 m de profundidade. O uso de sondas no campo permite repetir as medidas tanto quanto desejado, sem destruição das amostras, facilitando seu uso em solos cultivados. Vários pesquisadores têm utilizado o MSN para diagnosticar camadas compactadas (CÁSSARO et al., 2000a e b), estudar a distribuição espaço-temporal da densidade e umidade do solo ao longo de uma transeção (TIMM et al., 2006; TOMINAGA et al., 2002), analisar o comportamento dinâmico entre a umidade e a temperatura do solo ao longo de uma transeção espacial (DOURADO-NETO et al., 1999), dentre outros trabalhos.

Este trabalho tem como objetivo comparar os valores de densidade do solo obtidos através de técnicas convencionais (método do torrão parafinado (MTP) e do anel volumétrico (MAV)) e nucleares (tomografia computadorizada (MTC), atenuação gama (MAG) e sonda de superfície nêutron-gama (MSN)) e fornecer subsídios que possam facilitar a escolha do método que seja mais representativo para a determinação de d_s .

Material e métodos

Área experimental e coleta das amostras

As amostras de solo para as análises de d_s em laboratório (MAV, MTP, MAG e MTC) foram coletadas em áreas experimentais da Fazenda Areão (ESALQ/Piracicaba, Estado de São Paulo), sistema de plantio convencional, e Estação Experimental do IAPAR (Ponta Grossa, Estado do Paraná), em sistema de plantio direto.

O solo de Piracicaba foi classificado como um Nitossolo Vermelho eutrófico (430 de argila, 240 de areia, 330 de silte e 20,2 g kg⁻¹ de MO) e o de Ponta Grossa como um Latossolo Vermelho distrófico (640 de argila, 120 de areia, 240 de silte e 62,5 g kg⁻¹ de MO). As análises de densitometria gama (MAG e MTC) foram realizadas no CENA (Piracicaba, Estado de São Paulo) e as análises convencionais (MAV e MTP) no IAPAR (Ponta Grossa, Estado do

Paraná). As medidas de campo utilizando a sonda de superfície nêutron-gama foram realizadas somente no sistema de plantio convencional.

As amostras de torrão foram coletadas na camada superficial (0-15 cm) com volumes variando entre 50 a 100 cm³. Amostras de torrão também foram usadas nas medidas pelos MAG e MTC (plantio convencional). Para o MAV foram coletadas amostras em cilindros de aço com bordas biseladas (diâmetro de 5 cm, altura de 5 cm e volume de 98,1 cm³). O MAG foi aplicado nas mesmas amostras do MAV nas medidas de d_s para a área de plantio direto.

Tomografia computadorizada

Um tomógrafo de primeira geração de raios gama com fonte radioativa de ²⁴¹Am ($A = 3,7$ GBq/ $E_\gamma = 59,54$ keV) e detector de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm foi empregado no MTC. Colimadores de Pb com diâmetros de 2 e 4,5 mm foram acoplados na fonte e detector para evitar que fótons espalhados de menor energia (secundários) fossem detectados (fator "build up"). Os passos angulares do sistema foram de 2,25° até uma completa rotação de 180°. Para a reconstrução das imagens tomográficas foi utilizado o programa Microvis (EMBRAPA-CNPDIA 2000). A calibração do sistema tomográfico foi obtida através da correlação linear (α) entre os coeficientes de atenuação linear (μ) e as unidades tomográficas (UT) de diferentes materiais (VAZ et al., 1989).

Para a obtenção de d_s dos torrões foi usada a seguinte equação:

$$d_s = \frac{(UT/\alpha) - \mu_{ma} U d_a}{\mu_{ms}} \quad (1)$$

em que:

μ_{ms} and μ_{ma} (cm² g⁻¹) são os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água; U (g g⁻¹) a umidade gravimétrica residual uma vez que a tomografia foi realizada em amostras secas ao ar e d_a (g cm⁻³) representa a densidade da água.

Atenuação gama

O sistema usado para as determinações de d_s pelo MAG consiste dos mesmos equipamentos utilizados na tomografia com exceção de que a amostra permanece estática durante as medidas. À distância fonte/detector foi mantida em 20 cm e as medidas de d_s foram realizadas em diferentes posições para cada amostra e obtidas a partir da seguinte equação:

$$d_s = \frac{1}{x\mu_{ms}} \left[\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) - x\mu_{ma}\theta \right] \quad (2)$$

em que:

I_0 e I (ctg) são a intensidade do feixe incidente e transmitido através da amostra de solo de espessura x (cm) e θ (cm³ cm⁻³) é a umidade volumétrica. Como as amostras de solo foram secadas em estufa a temperatura de 60°C ao longo de 5 dias o termo envolvendo θ na equação 2 foi desconsiderado.

Sonda de superfície nêutron-gama

Uma sonda de superfície nêutron-gama (CPN, modelo MC-3) com fonte de radiação de ¹³⁷Cs ($A = 0,37$ GBq/ $E_\gamma = 661,6$ keV) e detector Geiger-Mueller (GM) foi usada no MSN. O volume "amostrado" pela sonda na medida de d_s corresponde aproximadamente a uma semi-esfera de 10 cm de raio (2093 cm³). As medidas de densidade úmida (d_{su}) estão baseadas nos processos de atenuação e retroespalhamento dos fótons gama no solo (WANG et al., 1975). A densidade média do volume amostrado (V) é medida após os fótons gama interagirem com as camadas do solo transformando as contagens obtidas em valores de densidade seca (d_{ss}) através da seguinte equação (CÁSSARO et al., 2000b):

$$d_{su} = \frac{(m_s + m_a)}{V} = d_{ss} + \theta \quad (3)$$

em que:

m_s e m_a (g) são as massas de sólidos e água, respectivamente.

A calibração utilizada para as medidas de d_{su} com a sonda foi feita como sugerida por Cássaro et al. (2000b) e é dada através do seguinte modelo:

$$d_{su} = B \cdot \ln[A \cdot (R - C)^{-1}] \quad (4)$$

em que:

A , B e C são coeficientes obtidos por regressão; R é a razão de contagem calculada através da divisão da intensidade da radiação gama (I) registrada com a fonte na posição BS, pela intensidade padrão (I_{st}), que é registrada com a sonda na posição SAFE, quando colocada sobre um bloco de Teflon de espessura de 10 cm.

Análises estatísticas

Programas estatísticos foram usados para análise estatística dos dados. Análise de variância (ANOVA) e testes t e de Tukey ($p < 0,05$) foram aplicados na avaliação de diferenças estatísticas e na distinção de médias.

Resultados e discussão

As equações de calibração para as medidas de d_s para a sonda de superfície nêutron-gama e tomógrafo computadorizado são apresentadas na seqüência (equações 5 e 6). A análise do valor encontrado para o coeficiente de determinação (r^2) mostra que a reta de regressão linear está bem ajustada aos pontos obtidos experimentalmente para o MTC ($r^2 = 0,999$).

$$d_{su} = 1,0310 \cdot \ln\left(\frac{2,9637}{CR - 0,1688}\right) \quad (5)$$

$$UT = 0,955 \cdot \mu + 0,009 \quad (6)$$

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios, desvios padrão, coeficientes de variação (CV) e os valores mínimos e máximos de d_s determinados para cada um dos métodos e sistemas de manejo do solo adotados.

Tabela 1. Valores médios de densidade do solo (d_s) obtidos através dos diferentes métodos com seus respectivos desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV).

Manejo	Plantio Convencional				Plantio Direto		
	MAV	MSN	MTP	MAG	MTC	MAV	MAG
Métodos							
Parâmetros	d_s						
MED (g cm ⁻³)	1,54 ^b	1,49 ^b	1,69 ^a	1,68 ^a	1,71 ^a	1,03 ^a	1,10 ^b
DP (g cm ⁻³)	0,10	0,02	0,06	0,07	0,07	0,05	0,07
CV (%)	6,6	1,2	3,5	3,9	4,0	4,4	6,2
MAX (g cm ⁻³)	1,70	1,52	1,79	1,79	1,84	1,10	1,23
MIN (g cm ⁻³)	1,36	1,45	1,56	1,52	1,56	0,94	0,97

Os dados de valores médios de densidade equivalem a 16 repetições para cada método; Os valores seguidos de mesma letra nas amostras do plantio convencional não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e nas amostras do plantio direto não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$); MAV=método do anel volumétrico, MSN=método da sonda de superfície nêutron-gama, MTP=método do torrão parafinado, MAG=método da atenuação gama, MTC=método da tomografia computadorizada; MAX e MIN representam o máximo e mínimo valores de d_s para cada método.

No sistema de plantio convencional, o menor valor médio de d_s encontrado foi para o MSN (Tabela 1). Os MTP, MTC e MAG apresentaram valores de d_s bastante próximos sem diferenças significativas entre si (teste de Tukey, $p < 0,05$). Estes valores próximos já eram esperados, pois as análises pelos MTC e MAG foram realizadas nos mesmos torrões usados no MTP.

O MSN apresentou valores de d_s entre o MAV e as outras três metodologias. Não foram observadas diferenças significativas entre os MSN e MAV, embora tais diferenças tenham sido encontradas entre esses dois métodos e os demais. Resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho foram observados por Timm et al. (2005) que também encontraram menores valores de d_s para os MSN e MAV.

Alguns autores afirmam que o MTP apresenta valores maiores de d_s em relação ao MAV, tradicionalmente utilizado, devido ao fato de que

parafina penetra nos macroporos e pequenas fendas existentes no torrão. À perda de macroporos e a segregação no momento da coleta dos torrões também podem acarretar em valores maiores de d_s (BLAKE; HARTGE, 1986; KIEHL, 1979; VAN REMORTEL; SHIELDS, 1993). Segundo Van Remortel e Shields (1993) os valores de d_s obtidos pelo MTP são geralmente de 0,07 a 0,09 g cm⁻³ maiores do que aqueles medidos pelo MAV. Neste estudo os valores de d_s , em média, foram 0,15 g cm⁻³ maiores.

Foi observado durante a coleta dos torrões que somente àqueles mais densos mantiveram a boa estrutura para serem preparados e analisados em laboratório pelo método do torrão. Talvez este fato possibilite explicar a diferença dos resultados deste trabalho com os publicados por Van Remortel e Shields (1993). Silva et al. (2000) compararam os MTP e MAV para amostras de um Argissolo Vermelho distrófico arênico coletadas na superfície do solo e constataram diferenças de 0,14 g cm⁻³ entre essas duas metodologias.

Na Figura 1 as relações entre os valores de d_s obtidos entre o MTP e os MTC, MAG e MAV são apresentadas. Na Figura 1A observa-se que os valores de d_s pelo MTP foram subestimados e/ou superestimados em relação ao MTC. Resultado semelhante foi encontrado entre o MTP e MAG (Figura 1B).

O coeficiente de determinação (r^2) obtido da relação entre os valores de d_s foi de apenas 0,52 (MTP e MTC) e 0,41 (MTP e MAG) mostrando uma correlação positiva fraca dos dados. Com relação ao MTP e MAV foi encontrada uma correlação linear praticamente nula entre os dados ($r^2 = 0,001$) com os valores de d_s obtidos pelo MTP sendo maiores do que àqueles determinados pelo MAV (Figura 1C).

Tal resultado pode ser explicado pela análise realizada em amostras distintas e pelo fato das amostras do torrão apresentarem uma estrutura mais compacta durante a coleta como evidenciado pelos valores de d_s medidos pelo MTC (Tabela 1). Silva et al. (2000) encontraram ao compararem valores de d_s obtidos pelos MTP e MAV um valor de r^2 em torno de 0,54 indicando também uma grande dispersão dos dados.

Estes autores também obtiveram valores maiores de d_s pelo MTP em relação ao MAV. Van Remortel e Shields (1993) também encontraram resultados semelhantes ao mostrarem que solos bem estruturados de floresta possuem valores superiores de d_s para o MTP em relação ao MAV. A equação de regressão obtida por estes autores, para prever d_s do torrão a partir de dados de d_s do anel volumétrico, foi $d_{s(MTP)} = (1,011 \cdot d_{s(MAV)}) + 0,068$ apresentando uma boa correlação entre os métodos ($r^2 = 0,98$).

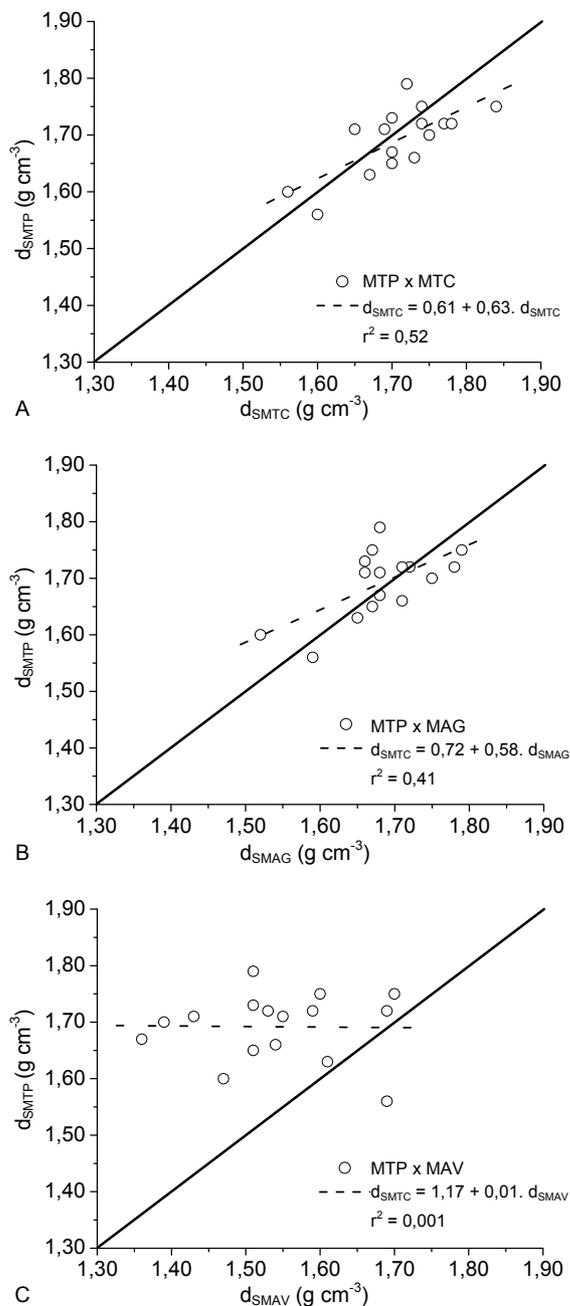


Figura 1. Relação entre as diferentes metodologias usadas na determinação da densidade do solo. (A) método do torrão parafinado (MTP) e da tomografia computadorizada (MTC); (B) método do torrão parafinado (MTP) e da atenuação gama (MAG); (C) método do torrão parafinado (MTP) e do anel volumétrico (MAV). Todas as análises foram realizadas em amostras submetidas a prática de manejo do plantio convencional.

Com relação ao MAG em ambos os sistemas de manejo do solo foram observados valores maiores de d_s em relação ao MAV. Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira e Rezende (2001) para três solos do interior de São Paulo. Estes autores observaram valores de d_s até $0,12 \text{ g cm}^{-3}$ maiores em relação ao MAV para amostras da camada superficial.

Na Tabela 1 é possível observar que os valores médios de d_s foram superiores para o MAG em relação ao MAV de $0,14$ e $0,07 \text{ g cm}^{-3}$ nos sistemas de plantio convencional e direto. Uma provável causa para essa diferença é que no MAG somente um pequeno volume da amostra é analisado. Esse volume é determinado pela espessura da amostra sendo varrida pelo feixe e a área de seção do feixe colimado. Caso a amostra possua dimensões pequenas (da ordem de poucos centímetros) pode-se considerar que o feixe incidente e o transmitido possuirão áreas de seção praticamente iguais. Como geralmente os feixes de radiação possuem áreas de seção milimétricas, durante as medidas de d_s o feixe pode atingir regiões da amostra de solo possuindo pequenas pedras ou buracos causados por raízes mortas ou mesmo minhocas. Quando isto ocorre os valores de d_s serão superestimados no primeiro caso e subestimados no último. Por este motivo geralmente os valores de d_s são determinados para diferentes posições das amostras obtendo-se um valor médio. No entanto, para amostras de torrão isto pode ser complicado devido à dificuldade de determinação com precisão da espessura da amostra cruzada pelo feixe de radiação que é um dos fatores cruciais para o cálculo de d_s (equação 2). Diferenças nas dimensões das amostras também pode ser uma causa de variações nas determinações de d_s (BAVEYE et al., 2002; PEDROTTI et al., 2003). A variabilidade espacial das amostras de solo também pode explicar essas diferenças nos valores de d_s em relação ao MAV. O trabalho de Pires et al. (2005) traz uma análise da variabilidade espacial da d_s para amostras de volume de 50 cm^3 coletadas em anel volumétrico. Para o plantio convencional as análises para os MAG e MAV foram realizadas em amostras distintas fato que não ocorreu no plantio direto. Isto pode também explicar as maiores diferenças de d_s observadas no primeiro sistema de manejo em relação ao último entre essas duas metodologias. Fante Júnior et al. (2002) trabalhando com os MTC e MTP encontraram valores de d_s bastante próximos para ambos os métodos para amostras da camada superficial. No trabalho destes autores as análises por ambas as metodologias foram realizadas nas mesmas amostras como no estudo deste trabalho.

Na Figura 2 são encontradas as relações entre os valores de d_s obtidos entre o MAG e os MTC e MAV (plantio convencional) e o MAV (plantio direto). É possível observar que existe uma grande dispersão dos dados com correlação linear praticamente nula entre os MAG e MAV ($r^2 = 0,01$). As principais causas

deste resultado podem ser: 1) à análise em amostras distintas, 2) a maior d_s das amostras do torrão e 3) a análise pontual usando o feixe gama (Figura 2A). Com relação aos MAG e MTC os dados de d_s foram menores no MAG em relação ao MTC e foi encontrada uma pequena dispersão dos dados com correlação positiva forte ($r^2 = 0,90$) (Figura 2B).

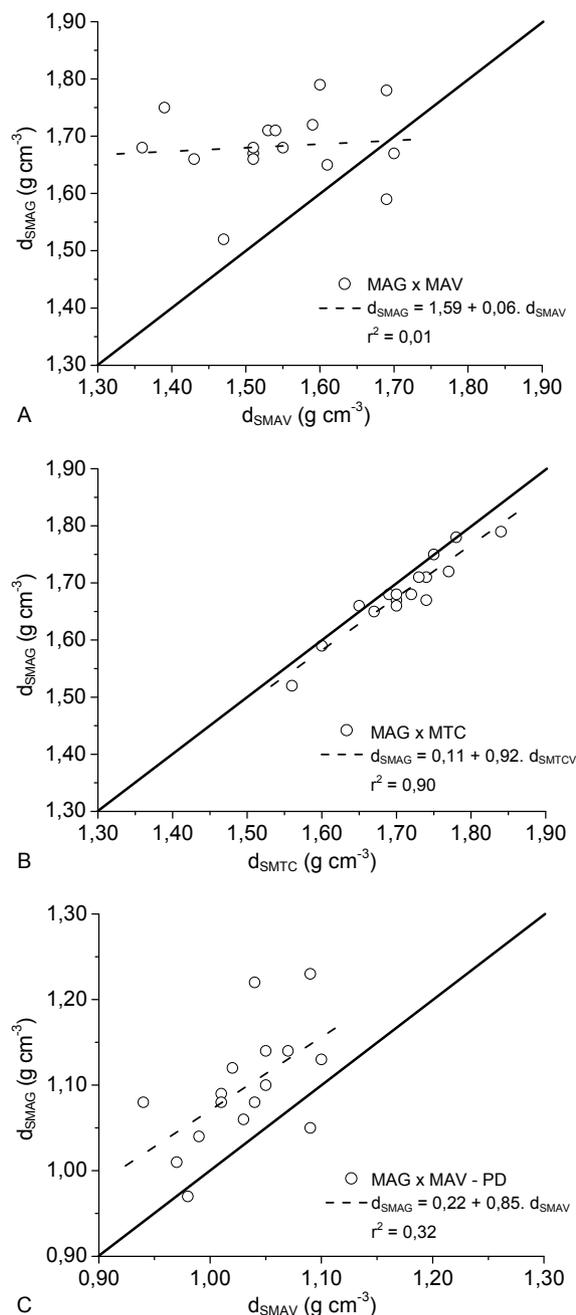


Figura 2. Relação entre as diferentes metodologias usadas na determinação da densidade do solo. (A) método da atenuação gama (MAG) e do anel volumétrico (MAV) – plantio convencional; (B) método da atenuação gama (MAG) e da tomografia computadorizada (MTC) – plantio convencional; (C) método da atenuação gama (MAG) e do anel volumétrico (MAV) – plantio direto.

Este resultado mostra que ambas estas técnicas nucleares apresentam medidas similares de d_s . Com relação ao plantio direto os MAG e MAV apresentam uma menor dispersão dos dados em relação ao plantio convencional embora ainda com uma correlação positiva fraca dos dados ($r^2 = 0,32$) (Figura 2C).

Os valores de d_s para o plantio direto também foram maiores para o MAG em relação ao MAV quando comparados ao plantio convencional. Um dos motivos da menor dispersão dos dados para o plantio direto é que a análise pelo método nuclear foi realizada nas mesmas amostras do MAV.

Com relação aos MSN e MAV e MTC (Figura 3), foi observada uma grande dispersão dos dados com correlação praticamente nula ($r^2 = 0,04$ – MSN e MAV; $r^2 = 0,05$ – MSN e MTC) e valores de d_s praticamente quase todos maiores pelo MAV em relação ao MSN (Figura 3A) e todos maiores pelo MTC em relação ao MSN (Figura 3B). Cássaro et al. (2000a), para um solo semelhante ao usado neste estudo, obtiveram valores de d_s $0,05 \text{ g cm}^{-3}$ menores do que àqueles medidos pelo MAV para o MSN. Analisando a Tabela 1 é possível observar que resultados similares foram encontrados neste trabalho. Alguns autores afirmam que os valores de d_s determinados através do MSN são menores do que àqueles do MAV devido ao volume de solo no qual os fótons gama oriundos da fonte de ^{137}Cs são retroespalhados e retornam ao detector. Neste estudo o volume amostrado pelo MSN foi estimado como sendo 20 vezes superior ao volume das amostras usadas no MAV possibilitando aos fótons gama serem retroespalhados em camadas mais profundas de solo de d_s média menor (BERTUZZI et al., 1987; RAWITZ et al., 1982).

A relação entre os valores de d_s obtidos entre o MTC e MAV (Figura 3C) indica uma grande dispersão dos dados com correlação praticamente nula ($r^2 = 0,04$). Pedrotti et al. (2005) encontraram um resultado oposto ao verificado neste trabalho obtendo uma correlação positiva forte entre os dados ($r^2 = 0,95$). No entanto, no trabalho destes últimos autores as análises tomográficas foram realizadas nas mesmas amostras da análise pelo MAV, fato que não ocorreu neste trabalho.

Pedrotti et al. (2005) indicaram que para solos submetidos a diferentes tipos de manejo os valores de d_s são algumas vezes maiores para o MAV em relação ao MTC e outras menores. Segundo estes autores o erro nas medidas de d_s devido ao processo de emissão de um fóton gama pela fonte radioativa foi de $0,05 \text{ g cm}^{-3}$. O tamanho diferente das amostras também pode ter sido uma das causas da diferença nas medidas de d_s no estudo apresentado neste trabalho (PEDROTTI et al., 2003).

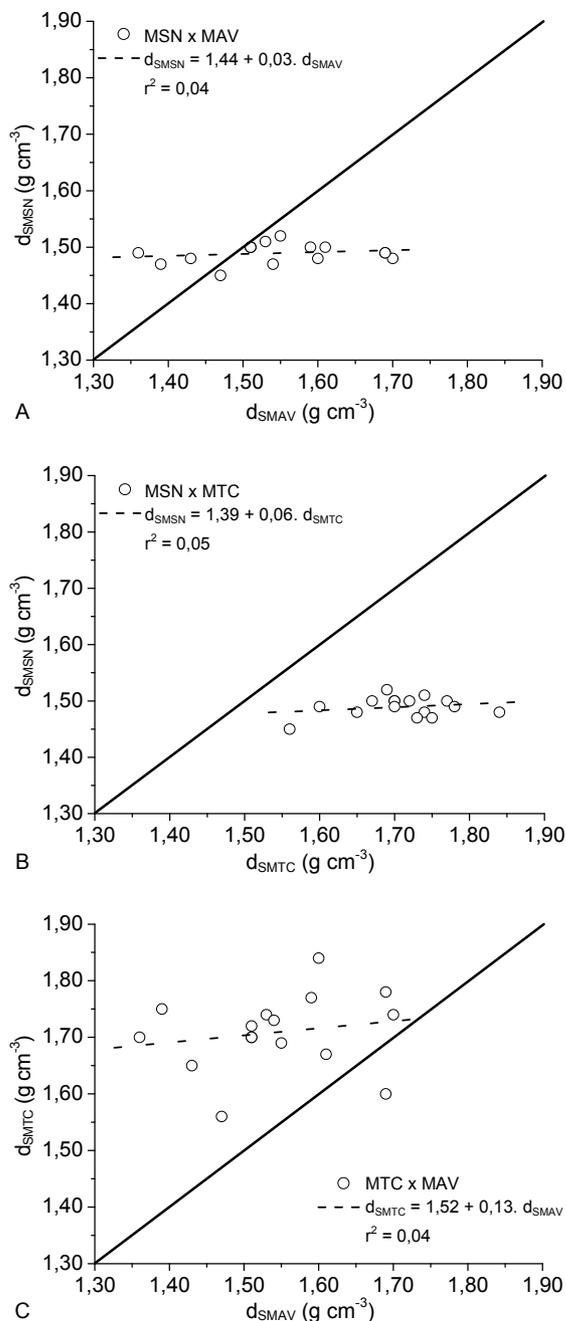


Figura 3. Relação entre as diferentes metodologias Usadas na determinação da densidade do solo. (A) método da sonda de superfície nêutron-gama (MSN) e do anel volumétrico (MAV); (B) método da sonda de superfície nêutron-gama (MSN) e da tomografia computadorizada (MTC); (C) método da tomografia computadorizada (MTC) e do anel volumétrico (MAV). Todas as análises foram realizadas em amostras submetidas a prática de manejo do plantio convencional.

Os dados da Tabela 1 indicam uma diferença de $0,17\ g\ cm^{-3}$ entre os MTC e MAV. A análise das imagens tomográficas mostrou que alguns torrões de solo (plantio convencional) apresentavam pedregulhos no seu interior o que pode ter conduzido a valores superestimados de d_s para o

MTC. Problemas durante a calibração do tomógrafo também podem levar a erros nas medidas de d_s . No entanto, como os valores de d_s entre os MTP, MAG e MTC não apresentaram diferenças significativas é possível concluir que o procedimento de calibração foi bem conduzido para este estudo.

Na Figura 4 visualiza-se análises comparativas das diferenças de d_s entre as amostras usadas neste estudo (16 amostras) para os MTC, MAG e MTP (plantio convencional) e MAV e MAG (plantio direto).

As Figuras 4A e B indicam que as diferenças de d_s entre os MTC e MAG para todas as amostras são menores do que 5%, demonstrando uma boa correlação entre esses dois métodos para o plantio convencional. Este resultado é esperado uma vez que existem erros intrínsecos nas medidas de qualquer propriedade física do solo por métodos nucleares devido ao processo de decaimento radioativo (WANG et al., 1975). As configurações de distância entre fonte e detector e tamanho de colimadores foram às mesmas para ambos os métodos, fato que pode ser crucial para obtenção de uma boa correlação entre as metodologias. O tamanho das amostras também foram os mesmos uma vez que diferentes dimensões destas podem influenciar em medidas do coeficiente de atenuação ϵ , conseqüentemente, em avaliações de propriedades físicas do solo pelos MTC e MAG (SIDHU et al., 2000).

Com relação aos MTC e MTP (Figuras 4C e D) os erros foram menores do que 8% demonstrando uma correlação razoável entre os dados para o plantio convencional. Diferenças nestes resultados de d_s , como já discutidos, estão associadas principalmente à estatística de decaimento radioativo e a vedação dos torrões com parafina para a análise pelo MTP. Já para o plantio direto a comparação entre os MAV e MAG (Figuras 4E e F) indica que os erros foram menores do que 10% para a maior parte das amostras com somente três delas apresentando diferenças de d_s entre 10 e 17%. Novamente, pode-se dizer que foi obtida uma correlação razoável para os valores de d_s entre ambas as metodologias.

Por fim, a comparação de qual método é o mais adequado para medidas de d_s é praticamente impossível uma vez que depende de uma série de parâmetros tais como: disponibilidade de equipamentos (geralmente caros para as técnicas nucleares), análise em laboratório ou diretamente no campo (MSN), tamanho de amostra a ser analisada (MAG, MTC, MTP e MAV), tipo de estudo a ser conduzido, etc. Os métodos nucleares possuem a vantagem de serem não invasivos e geralmente permitem medidas rápidas de d_s em laboratório e

diretamente no campo. No caso da tomografia é possível uma análise detalhada de d_s em camadas milimétricas ou micrométricas. Os métodos convencionais do torrão parafinado e anel volumétrico possuem a vantagem de serem mais baratos e acessíveis. Porém, possuem como desvantagem o fato de serem invasivos e

ocasionarem alterações na estrutura do solo dependendo da ferramenta de amostragem (MAV) e dimensões das amostras coletadas (PIRES et al., 2004). Tal fato também pode ocorrer no caso das amostras coletadas para medidas pelas técnicas nucleares, embora estas metodologias não sejam invasivas.

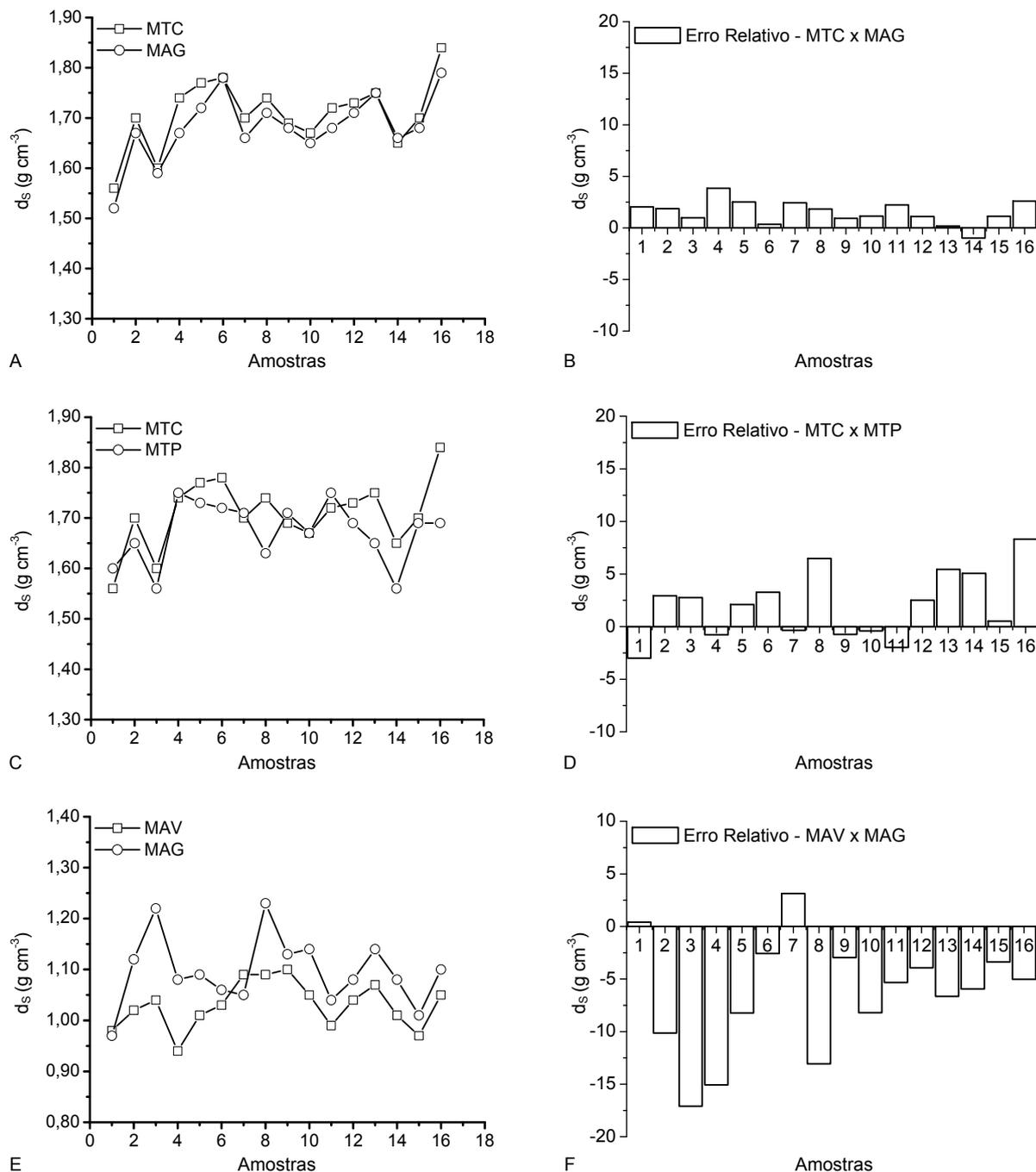


Figura 4. Comparação das diferentes metodologias de determinação da densidade do solo para todas as amostras usadas no estudo. (A) método da tomografia computadorizada (MTC) e da atenuação gama (MAG) – plantio convencional; (B) erro relativo entre os métodos da MTC e MAG; (C) método da tomografia computadorizada (MTC) e do torrão parafinado (MTP) – plantio convencional; (D) erro relativo entre os métodos da MTC e MTP; (E) método do anel volumétrico (MAV) e da atenuação gama (MAG) – plantio direto; (F) erro relativo entre os métodos do MAV e MAG.

Conclusão

Os valores de densidade do solo (d_s) obtidos pelos métodos do anel volumétrico (MAV) e sonda de superfície nêutron-gama (MSN) não apresentaram diferenças significativas, porém apresentaram diferenças quando comparados aos métodos da tomografia (MTC), atenuação gama (MAG) e torrão parafinado (MTP) para o sistema de manejo de plantio convencional. No caso do plantio direto os MAG e MAV apresentaram diferenças significativas para os valores de d_s .

Somente os MTP e MTC ($r^2 = 0,52$), MTP e MAG ($r^2 = 0,41$) e MTC e MAG ($r^2 = 0,90$) apresentaram correlações razoáveis entre si para as amostras de plantio convencional. Com relação ao plantio direto os MAG e MAV apresentaram uma correlação positiva fraca dos dados ($r^2 = 0,32$).

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de pesquisa para o primeiro e último autor e ao Dr. Osny Bacchi, do Laboratório de Física do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (USP/CENA), por ceder os equipamentos para as medidas usando técnicas nucleares.

Referências

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.

BAVEYE, P.; ROGASIK, H.; WENDROTH, O.; ONASCH, I.; CRAWFORD, J. W. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with X-ray tomography data. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 775-784, 2002.

BERTUZZI, P.; BRUCKLER, L.; GABILLY, Y.; GAUDU, J. C. Calibration, field-testing, and error analysis of a gamma-ray probe for in situ measurement of dry bulk density. **Soil Science**, v. 144, n. 6, p. 425-436, 1987.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 363-375.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA J. C. M.; TIMM, L. C. Improved laboratory calibration of a single-probe surface gamma-neutron gauge. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, n. 5, p. 937-946, 2000a.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA J. C. M.; TIMM, L. C. The use of a surface gamma-neutron gauge to explore compacted layers. **Soil Science**, v. 165, n. 8, p. 665-676, 2000b.

COSTA, M. J.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; DE SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

DAM, R. F.; MEHDI, B. B.; BURGESS, M. S. E.; MADRAMOOTOO, C. A.; MEHUYS, G. R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 41-53, 2005.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; TOMINAGA, T. T.; CASSARO, F. A. M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4 s. 0, p.1215-1221, 1999.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPDS, 1997.

EMBRAPA-CNPDIA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Instrumentação Agropecuária. **Microvis – Programa de Reconstrução e Visualização de Imagens Tomográficas. Guia do Usuário**. São Carlos: Embrapa-CNPDIA, 2000.

FANTE JÚNIOR, L.; OLIVEIRA, J. C. M.; BASSOI, L. H.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 835-842, 2002.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

MARTINS, M. V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, 147-154, 2009.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; DA SILVA, A. M. Planossol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 735-740, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; HOLANDA, F. S. R.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 115-123, 2005.

PEREIRA, J. R. A.; REZENDE, M. A. Determinação da densidade do solo para diferentes tipos de manejos e metodologias. **Irriga**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2001.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, n. 7, p. 857-863, 2004.

- PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Application of γ -ray computed tomography to analysis of soil structure before density evaluations. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 63, n. 4, p. 505-511, 2005.
- PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.
- RAWITZ, E.; ETKIN, H.; HAZAN, A. Calibration and field testing of a two-probe gamma gauge. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 3, p. 461-465, 1982.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2008.
- SIDHU, G.; SINGH, K.; SINGH, P.; MUDAHAR, G. S. Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements for bakelite and perspex. **Pramana Journal of Physics**, v. 53, n. 5, p. 851-855, 2000.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 1065-1068, 2000.
- THIMÓTEO, C. M. S.; BENINNI, E. R. Y.; MURATA, I. N.; TAVARES FILHO, J. Alterações da porosidade e da densidade de um latossolo vermelho distrófico em dois sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 23, p. 1299-1303, 2001.
- TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R. J. C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 55-64, 2006.
- TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005.
- TOMINAGA, T. T.; CÁSSARO, F. A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; TIMM, L. C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research**, v. 40, n. 4, p. 605-614, 2002.
- VAN REMORTEL, R. D.; SHIELDS, D. A. Comparison of clod and core methods for determination of soil bulk density. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 24, n. 6, p. 2517-2528, 1993.
- VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P. E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Technology**, v. 2, n. 3, p. 313-321, 1989.
- WANG, C. H.; WILLIS, D. L.; LOVELAND, W. D. Characteristics of ionizing radiation. In: WANG, C. H.; WILLIS, D. L.; LOVELAND, W. D. (Ed.). **Radiotracer methodology in the biological environmental and physical sciences**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1975. p. 39-74.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

Received on October 20, 2008.

Accepted on April 16, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.