

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A DENSIDADE MÁXIMA OBTIDA NO ENSAIO PROCTOR⁽¹⁾

João Alfredo Braida⁽²⁾, José Miguel Reichert⁽³⁾, Milton da Veiga⁽⁴⁾ & Dalvan José Reinert⁽³⁾

RESUMO

A susceptibilidade do solo à compactação, avaliada pelo ensaio Proctor, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente. Em geral, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é o valor de densidade máxima obtido e maior é o teor de água necessário para atingi-lo. As características da palha, como sua baixa densidade, elasticidade e susceptibilidade à deformação, tornam-na potencialmente capaz de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo. O presente trabalho foi realizado para estudar o efeito da matéria orgânica do solo no comportamento da curva de compactação e avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em dissipar a energia compactante. Amostras superficiais (0-0,05 m) de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico, de textura franco-arenosa, e de um Nitossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa, ambos com variações nos teores de matéria orgânica, foram submetidas ao ensaio Proctor Normal, determinando-se a densidade máxima e a umidade crítica para compactação. Determinaram-se, também, os limites de liquidez e de plasticidade e o teor de carbono orgânico. Para avaliar a capacidade da palha em dissipar a energia de compactação, amostras do Argissolo foram compactadas com a aplicação de uma camada de palha sobre o solo, dentro do cilindro do aparelho de Proctor, em quantidades correspondentes a 2, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹ de matéria seca. O acúmulo de matéria orgânica nos solos, proporcionado por diferentes sistemas de manejo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo, significando que o solo torna-se mais resistente à compactação. A magnitude desses efeitos, contudo, foi dependente da granulometria do solo. A palha na superfície do solo, durante a realização do ensaio Proctor, dissipou até 30 % da energia de compactação utilizada, com redução da densidade obtida,

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado, apresentada, pelo primeiro autor, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria – PPGCS/UFSM. Financiada parcialmente por CAPES, CNPq e FAPERGS. Recebido para publicação em agosto de 2004 e aprovado em março de 2006.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Campus Pato Branco, Coord. de Agronomia, CEP 85501-970, Pato Branco (PR). E-mail: braida@utfpr.edu.br

⁽³⁾ Professor Adjunto, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Centro de Ciências Rurais, Depto. de Solos, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). E-mail: reichert@smail.ufsm.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI, Estação Experimental de Campos Novos, CEP 89620-000, Campos Novos (SC). E-mail: milveiga@epagri.rct-sc.br

confirmando a hipótese de que a palha existente sobre o solo é capaz de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e animais.

Termos de indexação: compactação do solo, dissipação de energia de compactação, matéria orgânica do solo, limite de liquidez, limite de plasticidade.

SUMMARY: MULCH AND SOIL ORGANIC CARBON CONTENT AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE MAXIMUM SOIL DENSITY OBTAINED IN THE PROCTOR TEST

The susceptibility of soils to compaction, measured by the Proctor test, decreases with increasing soil organic matter (SOM) content. For a given energy level, with increasing SOM contents the maximum obtained density decreases and the corresponding critical moisture content increases. Due to its low density, elasticity and deformation susceptibility, straw is potentially able to dissipate applied loads. This study was conducted to evaluate the SOM effect on the soil compaction curve and to evaluate the ability that mulch has to absorb compactive energy in the Proctor test. The compaction test was carried out using soil surface samples (0 to 0.05 m) of a Hapludalf, with sandy loam texture at its soil surface, and an Oxisol, with clayey texture at its soil surface, both with variations in the SOM content. The maximum density, the critical moisture content, the liquid and plastic limits, and the soil organic carbon content were determined. A second test was performed to evaluate the ability of mulch to absorb compactive energy, by compacting Hapludalf samples with the presence of a straw layer on the soil surface, inside a Proctor cylinder, at amounts corresponding to 2, 4, 8 and 12 Mg ha⁻¹. SOM accumulation reduced the maximum density and increased the critical moisture content, suggesting an increased resistance to soil compaction. In the Proctor test the straw on the soil surface dissipated up to 30 % of the compactive energy and reduced the bulk density, confirming the hypothesis that mulch can absorb part of the compactive energy caused by machine traffic and by animals.

Index terms: soil compaction, dissipation of compactive energy, soil organic matter, liquid limit, plastic limit.

INTRODUÇÃO

O trânsito de máquinas ou de animais sobre o solo, quando esse se encontra em condições inadequadas de umidade, é uma das principais causas da compactação observada em muitas lavouras e que resulta em danos à produção das culturas vegetais, visto que a umidade do solo é um dos principais fatores determinantes da susceptibilidade à compactação (Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2002). Entretanto, algumas atividades, como a aplicação de agroquímicos para o combate de pragas e doenças ou a colheita, não permitem que o agricultor possa utilizar máquinas apenas quando o solo está em condições adequadas para tanto. Assim, além do desenvolvimento de máquinas com menor potencial para a compactação, o manejo do solo com vistas em melhorar sua resistência à compactação constitui uma alternativa que pode ajudar a minorar tais danos.

O acúmulo de matéria orgânica, que pode ser obtido a partir de um manejo adequado do solo e dos resíduos culturais, geralmente está associado a uma melhora das condições físicas do solo (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Campos et al., 1995; Arvidsson,

1998), especialmente pelos benefícios que a matéria orgânica pode trazer à sua estrutura (Baumgartl & Horn, 1991). No sistema plantio direto, a inexistência de revolvimento do solo, associada à manutenção de uma camada de resíduos orgânicos na sua superfície, permite um enriquecimento de material orgânico em sua camada superficial (Machado & Brum, 1978; Merten & Mielniczuk, 1991; Ismail et al., 1994; Amado et al., 2001), com prováveis reflexos na resistência à compactação. Além disso, espera-se que os resíduos mantidos na superfície do solo possam dissipar parte da energia produzida pelo impacto das rodas das máquinas e pelas patas dos animais que transitam sobre solos.

A susceptibilidade à compactação pode ser avaliada com o ensaio Proctor normal ou suas variantes. Esse teste foi desenvolvido pela engenharia civil para determinar a umidade adequada para obter a máxima compactação do solo na construção de estradas (Vargas, 1977), ou seja, a umidade em que o solo está mais susceptível à compactação. No ensaio Proctor, para uma mesma energia de compactação, a densidade obtida depende da umidade do solo, ou seja, a densidade aumenta com o incremento da umidade até determinado valor e,

depois, torna-se decrescente. Assim, compactando o solo em várias umidades, mas sempre com a mesma energia, e relacionando-se os valores de densidade obtidos com a umidade de compactação, obtém-se a curva de compactação do solo, da qual se calculam a umidade crítica de compactação e a densidade máxima correspondente.

A susceptibilidade à compactação, avaliada pelo ensaio Proctor, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo. Em geral, observa-se que, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é o valor de densidade máxima obtido e maior é o teor de água necessário para atingi-lo. Isso foi observado em estudos com um mesmo solo, porém com diferentes teores de matéria orgânica (Aragón et al., 2000; Ball et al., 2000), em estudos com diferentes solos de mesma textura e com teores de matéria orgânica diferentes (Silva et al., 1986) e em estudos com a adição ao solo de material orgânico semidecomposto (Stone & Ekwue, 1993; Zhang et al., 1997). Segundo esses autores, isso ocorre pelas seguintes razões: efeito amortecedor da matéria orgânica, que resulta em dissipação de parte da energia aplicada; capacidade de retenção da água da matéria orgânica, que, ao retê-la junto de suas partículas, impede que a água atue como lubrificante entre as partículas minerais; capacidade da matéria orgânica em estabelecer ligações entre as partículas de solo, aumentando a coesão entre as mesmas, e baixa densidade da matéria orgânica, de modo que, ao aumentar o teor de matéria orgânica, diminui a densidade da mistura solo e matéria orgânica.

Considerando que o ensaio Proctor é pouco usual nos laboratórios de análises de solo para fins agronômicos e por exigir uma amostra relativamente grande de solo (cerca de 4 kg), vários autores têm sugerido índices alternativos para determinar a umidade crítica de compactação. Nesse sentido, Ojeniyi & Dexter (1979) sugerem que seja utilizada a umidade correspondente a 90 % do limite de plasticidade, o que foi corroborado pelas observações de Figueiredo et al. (2000).

Além do enriquecimento de matéria orgânica do solo, o sistema plantio direto permite o acúmulo de resíduos vegetais na sua superfície. A baixa densidade desses resíduos orgânicos, associada com sua susceptibilidade à deformação e elasticidade, torna-os potencialmente capazes de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo. Essa possibilidade foi confirmada por Dao (1996), ao observar que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 0,05 e 0,125 m de profundidade, no sistema de cultivo convencional, e entre 0 e 0,05 m, no plantio direto. O autor concluiu, ainda, que a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo contribuiu para maior macroporosidade na camada superficial em solos sob cultivos conservacionistas. Acharya &

Sharma (1994) também observaram que a presença de resíduos na superfície do solo preveniu a compactação superficial do solo.

Contrariamente, Gupta et al. (1987) não observaram diferenças significativas na densidade do solo, quando submetido a tráfego, tendo diferentes quantidades de resíduos de milho na superfície. Entretanto, observaram que o aumento na quantidade de palha na superfície reduziu a pressão atuante no solo, medida a 20 cm de profundidade, bem como reduziu o afundamento superficial, confirmando a hipótese de que os resíduos superficiais podem dissipar cargas aplicadas sobre o solo. Seguindo essa linha de raciocínio, Silva et al. (2000) observaram que a existência de uma cobertura vegetal de cerca de 1 Mg ha⁻¹ de resíduos vegetais na superfície do solo, durante o período de pastoreio, pode ter contribuído para o pequeno efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo, quando comparado ao cultivo do solo. Para os autores, os resíduos vegetais podem ter absorvido parte da carga resultante do impacto das patas dos animais sobre o solo durante o período de pastoreio.

O presente trabalho objetivou: (1) avaliar o efeito da matéria orgânica do solo, produzida por diferentes manejos de solo e resíduos orgânicos, sobre a curva de compactação do mesmo e (2) avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em dissipar a energia compactante resultante do trânsito de máquinas e animais sobre o solo.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, utilizaram-se amostras superficiais (0–0,05 m de profundidade) obtidas em dois experimentos, um deles realizado em um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico, de textura franco-arenosa, e o outro sobre um Nitossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa. No quadro 1, encontra-se a caracterização física dos solos estudados, considerando apenas a camada de 0–0,05 m de profundidade, que foi a camada amostrada para o presente estudo.

O Argissolo foi amostrado em um experimento na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, no município de Santa Maria (RS). Nesse experimento, foram avaliadas diferentes combinações de doses de esterco líquido de suínos com plantas de cobertura de inverno, com o cultivo da cultura do milho no verão, no sistema plantio direto (Giacomini, 2001). As amostras foram coletadas em novembro de 2002, antes da semeadura do quinto cultivo de verão no experimento, buscando-se uma ampla variação no teor de carbono orgânico. Para isso, coletaram-se amostras em oito parcelas do experimento, com base no teor de carbono orgânico na camada de 0–0,05 m de profundidade, e sete amostras em áreas circunvizinhas ao experimento, totalizando 15 amostras.

Quadro 1. Granulometria, densidade de partículas e teor de carbono orgânico da camada superficial (0–0,05 m) de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico

		Argissolo	Nitossolo
Granulometria (g kg ⁻¹)	Argila	155	787
	Silte	216	185
	Areia fina	459	18
	Areia grossa	170	10
Densidade de partículas (Mg m ⁻³)		2,575	2,804
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	Média	11,3	26,0
	Amplitude	6,5 a 18,8	21,5 a 33,0

O Nitossolo foi amostrado em um experimento localizado na Estação Experimental de Campos Novos da EPAGRI (EECN/EPAGRI – Campos Novos, SC). Nesse experimento, foram avaliados diferentes sistemas de manejo de solo e de resíduos culturais e insumos orgânicos (Veiga & Pandolfo, 1998). As amostras foram tomadas em dezembro de 2001, durante o oitavo cultivo de verão no experimento. Novamente, pretendeu-se obter uma ampla variação no teor de carbono orgânico, escolhendo-se 20 parcelas com base no teor de carbono orgânico da camada de 0–0,05 m de profundidade.

As amostras, que continham aproximadamente 4 kg de solo, foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas (peneira com abertura da malha de 0,002 m), no laboratório. Durante a coleta e manipulação das amostras, procurou-se eliminar todo o material orgânico não decomposto existente, tais como: fragmentos de folhas, frutos, talos e raízes.

O ensaio Proctor Normal foi realizado com o uso de um aparelho marca Soiltest modelo CN-4230, sendo a amostra compactada em um anel metálico de, aproximadamente, 0,001 m³, em três camadas de solo, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 0,305 m, semelhantemente ao que é preconizado na Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986) e correspondendo a uma energia de 60,2 kJ m⁻³. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em cinco ou seis teores de água, com intervalos de cerca de 0,025 kg kg⁻¹ de umidade gravimétrica, partindo de uma umidade que permitisse que o terceiro ponto da curva ficasse próximo à umidade crítica. Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo de prova (topo e fundo), para determinação da umidade do solo (Ug). Para o Argissolo, foram realizadas duas repetições de laboratório do ensaio de Proctor, enquanto, para o Nitossolo, realizou-se apenas uma repetição, de acordo com a disponibilidade de amostra.

Assim, para cada amostra, obtiveram-se cinco ou seis pares de valores de umidade (Ug) e densidade do solo (Ds), com os quais se ajustou o seguinte modelo matemático:

$$D_s = D_{si} + a e^{\left(-0,5 \left(\frac{U_g - U_{gc}}{b}\right)^2\right)} \quad (1)$$

sendo D_{si} = densidade inicial do solo (Mg m⁻³); a = incremento máximo na densidade inicial do solo (Mg m⁻³); b = coeficiente de ajuste (kg_{solo} kg⁻¹_{água}); e = base do logaritmo natural; U_g = umidade gravimétrica (kg_{água} kg⁻¹_{solo}); U_{gc} = umidade crítica de compactação (kg_{água} kg⁻¹_{solo}).

O valor da umidade crítica (U_{gc}) foi obtido diretamente na equação ajustada, enquanto a densidade máxima mostrou-se igual à soma dos parâmetros $D_{si} + a$ e correspondente às coordenadas do ponto de inflexão da curva.

O limite de liquidez (LL), que corresponde à umidade do solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão aberta na superfície da amostra, foi determinado conforme a Norma Técnica ABNT NBR 6459/84 (ABNT, 1984a), na qual se utiliza a fração do solo que passa pela peneira 40 (malha com abertura de 0,000425 m).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade na qual, ao se moldar um cilindro de solo com 0,003 m de diâmetro, surgem fissuras na superfície do solo (início da fragmentação), foi determinado conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 7180/84 (ABNT, 1984b), que também especifica o uso da fração do solo que passou pela peneira 40.

O teor de matéria orgânica foi estimado com base no teor de carbono orgânico do solo, em cada uma das amostras utilizadas, seguindo o método descrito pela Embrapa (1979) e fazendo-se duas repetições de laboratório para cada amostra.

Com o objetivo de avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em absorver a energia de compactação, empregou-se material de solo do Argissolo com umidade de 0,05 kg kg⁻¹. Inicialmente, determinou-se, utilizando-se o ensaio Proctor, a relação entre o nível de energia empregado e a densidade obtida, usando-se níveis de energia de 24,1; 36,1; 60,2 e 84,3 kJ m⁻³, que correspondem,

respectivamente, a 10, 15, 25 e 35 impactos de um soquete de massa igual a 2,50 kg, caindo de uma altura de 0,305 m, por camada de solo. Os ensaios foram realizados com 3 repetições. Com base nos resultados assim obtidos, ajustou-se a equação:

$$D_{s_{max}} = a + b(Ec) + c(Ec)^2 \quad (2)$$

em que $D_{s_{max}}$ = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); Ec = energia de compactação ($kJ\ m^{-3}$); a , b e c = coeficientes de ajuste ($Mg\ m^{-3}$, $Mg\ kJ^{-1}$ e $Mg\ m^3\ kJ^{-2}$, respectivamente).

Posteriormente, o ensaio Proctor foi realizado com a aplicação de uma camada de palha, composta de folhas de milho picadas em fragmentos de 3 a 4 cm de comprimento e com $0,12\ kg\ kg^{-1}$ de umidade gravimétrica, sobre o solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, em quantidades de palha correspondentes a 2, 4, 8 e $12\ Mg\ ha^{-1}$ de matéria seca. Essas determinações foram obtidas com o emprego de dois níveis de energia ($36,1$ e $60,2\ kJ\ m^{-3}$) e três repetições.

Assim, depois de colocar a primeira camada de solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, adicionava-se a quantidade de palha correspondente ao tratamento em questão. Então, fazia-se a compactação da camada e, depois, retirava-se a palha. Adicionava-se nova porção de solo, correspondente à segunda camada, e nova quantidade de palha. Fazia-se, então, a compactação da segunda camada e, mais uma vez, retirava-se a palha para adição da terceira camada de solo. Para evitar que a palha se misturasse em demasia com o solo, antes de adicioná-la, o solo foi levemente compactado manualmente. Este procedimento foi adotado também nas determinações realizadas apenas com solo, quando se avaliou a relação entre a energia de compactação e a densidade obtida.

Com base na equação que descreve a relação entre a densidade do solo e a energia de compactação (Equação 2) estimou-se, a partir dos valores de densidade obtidos com cada um dos tratamentos supradescritos, a energia de compactação correspondente. Com base na energia de compactação utilizada nos diferentes tratamentos e na energia equivalente correspondente, foi possível estimar a energia dissipada pela palha.

A análise estatística do primeiro experimento consistiu do ajuste de equações entre o teor de carbono orgânico e o LL, LP, U_{gc} e $D_{s_{max}}$. Para o caso do segundo experimento, cujo delineamento experimental foi obtido de um fatorial completamente casualizado, procedeu-se à análise de variância complementada, quando a mesma foi significativa, pela análise de regressão ou teste DMS (diferença mínima significativa), conforme o caso. Na apresentação das equações ajustadas, a significância das equações é indicada por asteriscos colocados junto ao coeficiente de determinação (R^2), sendo um e dois asteriscos para os níveis de 5 e 1 %, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade máxima e umidade crítica de acordo com o teor de CO

Dois exemplos de curvas de compactação estão apresentados na Figura 1. Essas curvas foram obtidas com duas amostras do Argissolo de textura franco-arenosa, uma com $9,3\ g\ kg^{-1}$ de carbono orgânico e a outra com $18,8\ g\ kg^{-1}$, com as respectivas equações que descrevem a curva de compactação e que foram usadas para estimar os valores da densidade do solo máxima ($D_{s_{Max}}$) e da umidade crítica para compactação (U_{gc}).

Com o aumento do teor de CO, a curva de compactação do solo deslocou-se para a direita e para baixo (Figura 1), indicando uma redução da densidade máxima obtida e um aumento da umidade necessária para atingi-la. Comportamento similar foi observado com as amostras do Nitossolo, concordando assim com as observações de Silva et al. (1986), Aragón et al. (2000) e Ball et al. (2000).

Para os dois solos, o efeito do CO sobre a densidade máxima obtida pelo teste Proctor Normal mostrou a mesma tendência, ou seja, reduziu a densidade máxima (Figura 2), corroborando os resultados obtidos por Silva et al. (1986), Stone & Ekwue (1993), Ekwue & Stone (1997), Zhang et al. (1997), Aragón et al. (2000) e Ball et al. (2000). Entretanto, observando o coeficiente angular (b) da equação que descreve a relação $D_{s_{Max}}$ vs. CO, percebe-se que, no solo franco-arenoso (Argissolo) com b de $0,0155$ (Figura 2), o efeito do CO é cerca de 2,3 vezes superior ao do argiloso (Nitossolo) com b de $0,0066$ (Figura 2). Isso acontece porque, provavelmente, no solo arenoso, o efeito da matéria orgânica em reduzir o efeito lubrificante da água

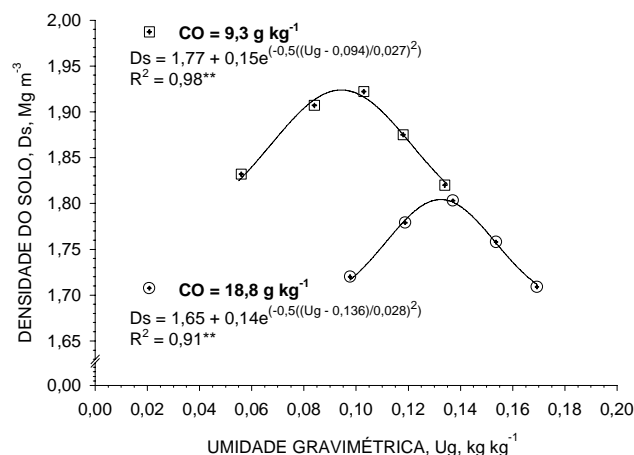


Figura 1. Curva de compactação de duas amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico com dois diferentes teores de carbono orgânico (** modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).

entre as partículas minerais é muito maior do que no argiloso. A matéria orgânica apresenta uma área superficial específica (ASE) variando de 8×10^5 a $9 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Meurer et al., 2000) e capacidade de troca de cátions (CTC) que pode chegar a $1.400 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Canellas et al., 1999), resultando em uma capacidade de retenção de água muito maior do que a da areia, cuja ASE é menor que $60 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ e a CTC é praticamente nula. Assim, na partição da água adicionada ao solo, a MO acaba retendo maior quantidade que aquela retida pela areia, de maneira que a água adicionada fica concentrada próximo das partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia. No solo argiloso, aquelas diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais são menores. Além disso, em princípio, nos solos argilosos, a interação entre a fração mineral e a orgânica é maior, o que resultaria em menor disponibilidade da matéria orgânica para interagir com a água adicionada ao solo.

Associado à redução da densidade máxima provocada pelo acúmulo de CO no solo, observou-se aumento da umidade crítica no Nitossolo (Figura 3) e no Argissolo (Figura 4). Novamente, observou-se um efeito menor do carbono orgânico no Nitossolo do que no Argissolo, provocado, provavelmente, pelas mesmas razões já discutidas para a densidade máxima.

De maneira geral, observou-se que a densidade máxima (Quadro 2) alcançada foi maior no Argissolo (média = $1,870 \text{ Mg m}^{-3}$) do que no Nitossolo (média = $1,404 \text{ Mg m}^{-3}$) e que a umidade crítica foi inferior no Argissolo, para um mesmo nível de energia. Essas diferenças estão relacionadas com o teor de argila e de areia de cada um dos solos (Quadro 1). A argila apresenta CTC variando de 0 a $150 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e ASE variando de 7×10^3 a $8 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, enquanto a areia apresenta a CTC praticamente nula e a ASE inferior

a $60 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Meurer et al., 2000). Essas características tornam a argila muito mais reativa que a areia, sendo capaz de interagir mais com a água, diminuindo seu efeito lubrificante entre as partículas minerais, assim como é capaz de apresentar maior coesão, diminuindo a susceptibilidade à compactação do solo.

Para o Nitossolo, o acúmulo de matéria orgânica resultou em aumento significativo dos limites de liquidez e de plasticidade (Figura 3), sem que houvesse alteração do índice de plasticidade (intervalo de umidade entre os limites de liquidez e de plasticidade). Segundo Baver et al. (1972), isso acontece porque a manifestação da plasticidade ocorre apenas depois que duas condições são atendidas: deve haver água suficiente para a formação de camadas rígidas de moléculas de água nas superfícies coloidais adjacentes e deve haver água extra para funcionar como lubrificante entre as camadas rígidas de moléculas de água. Assim, a matéria orgânica afetaria apenas a primeira demanda, tornando-a maior, mas não teria efeito sobre a segunda demanda de água.

O efeito do acúmulo de matéria orgânica no Nitossolo foi maior sobre os limites de plasticidade e de liquidez do que sobre a umidade crítica para compactação, como demonstram os valores dos coeficientes angulares das equações que descrevem as relações LL vs. CO, LP vs. CO e U_{gc} vs. CO, respectivamente, iguais a 0,0061; 0,0059 e 0,0022 (Figura 3).

Os limites de consistência do solo são determinados pelas relações entre as partículas sólidas e dessas com a água, que resultam nas forças de coesão e de adesão. O menor efeito da matéria orgânica sobre a umidade crítica para compactação, em relação ao efeito sobre os limites de consistência, pode ser explicado pelo fato de que, nessa determinação, além das forças de coesão e adesão, o atrito entre as

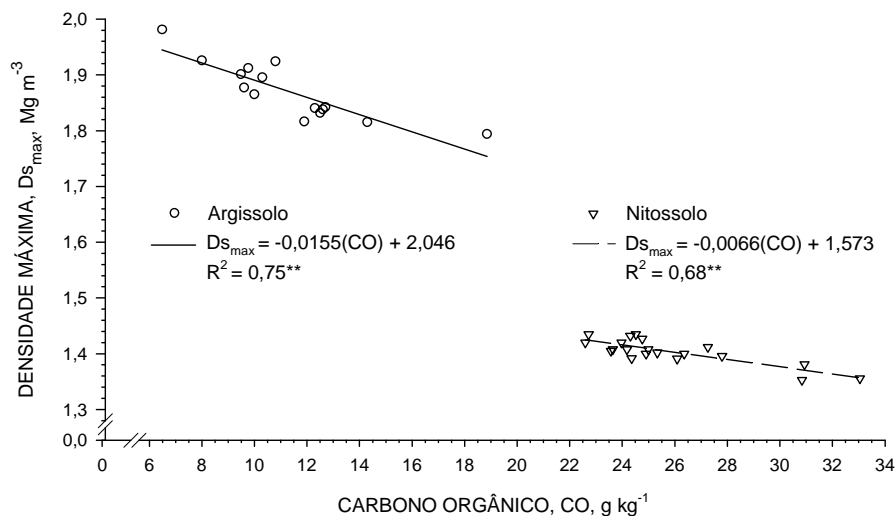


Figura 2. Densidade máxima obtida por meio do ensaio Proctor Normal, considerando o teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico e de um Nitossolo Vermelho distrófico (modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).**

partículas sólidas também está envolvido. Assim, o efeito da matéria orgânica sobre a umidade crítica de compactação é muito influenciado pelo efeito que ela produz sobre a capacidade da água em diminuir o atrito entre as partículas minerais. Esse efeito está relacionado com a habilidade da matéria orgânica em disputar a água existente no sistema com as partículas minerais, o que depende das características da própria matéria orgânica e das características das partículas minerais. Por isso, o efeito do acúmulo de CO sobre a umidade crítica foi maior no solo arenoso do que no solo argiloso, uma vez que, no primeiro, a matéria orgânica é muito mais hábil em reter água que as partículas minerais, sendo, portanto, mais eficiente em reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

No caso do Argissolo (Figura 4), o acúmulo de matéria orgânica não produziu efeito sobre a plasticidade do solo e, assim, independentemente do teor de CO, o mesmo não apresentou plasticidade, graças ao seu elevado teor de areia (629 g kg^{-1} , Quadro 1). Além disso, se observou um efeito menor sobre o limite de liquidez, talvez porque, nesse caso, o efeito sobre as forças de adesão, predominantes na faixa de umidade em que o solo é plástico, é diluído pelo fato de a fração mineral do solo conter baixa reatividade. Por outro lado, por essa mesma razão, acentuou-se a ação de reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

No presente estudo, observou-se para o Nitossolo que a umidade crítica de compactação média (Quadro 2) foi de $0,283 \text{ kg kg}^{-1}$ e o limite de plasticidade médio igual a 36 (correspondente a uma umidade de $0,364 \text{ kg kg}^{-1}$), resultando em uma razão Ug_c/LP igual a 0,78. Ojeniyi & Dexter (1979) indicam

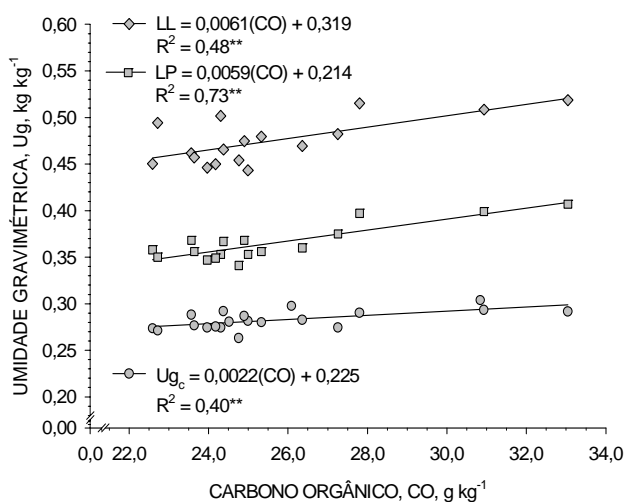


Figura 3. Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e umidade crítica para compactação (Ug_c), considerando o teor de carbono orgânico de um Nitossolo Vermelho distrófico (** modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).

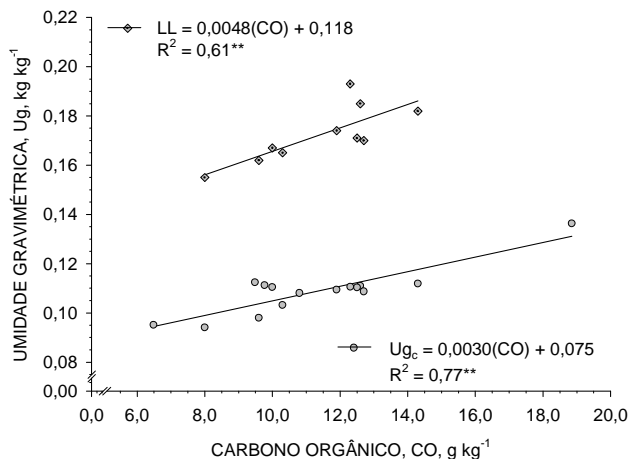


Figura 4. Limite de liquidez (LL) e umidade crítica para compactação (Ug_c), considerando o teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (** modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).

que essa razão é igual a 0,90, sugerindo que a Ug_c possa ser estimada como sendo igual a 90 % do limite de plasticidade. Entretanto, como pode ser visto na figura 5, no presente estudo, a razão Ug_c/LP foi influenciada pelo teor de carbono orgânico do solo, tornando-se menor à medida que o teor de carbono aumentou. Esse efeito deveu-se ao fato de a matéria orgânica ter maior efeito sobre o LP do que sobre a umidade crítica, como visto anteriormente (Figura 4). Considerando esse efeito da matéria orgânica sobre a razão Ug_c/LP , a estimativa da Ug_c a partir do LP pode resultar em valores subestimados, para baixos teores de MO, ou superestimados, quando o teor de MO for alto.

No caso do Argissolo, cuja Ug_c média foi de $0,109 \text{ kg kg}^{-1}$, não é possível utilizar o limite de plasticidade para estimar a umidade crítica, dada a ausência de plasticidade desse solo.

Os efeitos da matéria orgânica sobre a Ug_c , o LL e o LP, aumentando a umidade correspondente aos mesmos, implica redução da susceptibilidade do solo

Quadro 2. Valores médios da densidade máxima (Ds_{max}), umidade crítica (Ug_c), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e teor de carbono orgânico (CO) do Argissolo Vermelho-Amarelo arênico e do Nitossolo Vermelho distrófico

Solo	Ds_{max} Mg m ⁻³	Ug_c kg kg ⁻¹	LP	LL	CO g kg ⁻¹
Argissolo	1,870	0,109	-(1)	15	11,3
Nitossolo	1,404	0,283	36	48	26,0

(1) O Argissolo não apresentou plasticidade.

à compactação. O maior efeito sobre o LL e o LP, em relação à U_{g_c} , observada no Nitossolo, significa que, se a U_{g_c} for utilizada como indicador da umidade crítica, potencializa-se a diminuição dos riscos de compactação, visto que, quanto mais rico em MO for o solo, a U_{g_c} fica mais distante dos limites de plasticidade e de liquidez.

Densidade do solo de acordo com a quantidade de palha na superfície do solo

A densidade do solo cresceu com o aumento da energia de compactação empregada (Figura 6), apresentando relação quadrática. Os valores de densidade observados, mesmo com a menor energia de compactação empregada, são superiores aos normalmente observados no campo, demonstrando que a energia empregada no ensaio Proctor é superior àquela produzida pelas máquinas e animais que, normalmente, transitam sobre o solo. Segundo Raghavan et al. (1976), a energia de compactação utilizada no ensaio Proctor normal corresponde, aproximadamente, a 15 passadas de um trator de 0,720 Mg na roda, cerca de 140 kPa, em solo franco-arenoso. Além disso, deve-se considerar que o ensaio Proctor é realizado com o solo desestruturado, o que, teoricamente, aumenta sua susceptibilidade à compactação. Apesar disso, esse ensaio tem demonstrado ser um bom método para determinação da umidade crítica para a compactação (Figueiredo et al., 2000).

Os valores da densidade do solo foram dependentes da quantidade de palha presente sobre a sua superfície (Figura 7). Quanto maior a quantidade de palha presente sobre o solo durante a realização do ensaio Proctor, menores os valores obtidos de densidade do solo. Para o maior nível de E_c (60,2 kJ m⁻³), o modelo exponencial decrescente apresentou o melhor ajuste e, para a menor E_c

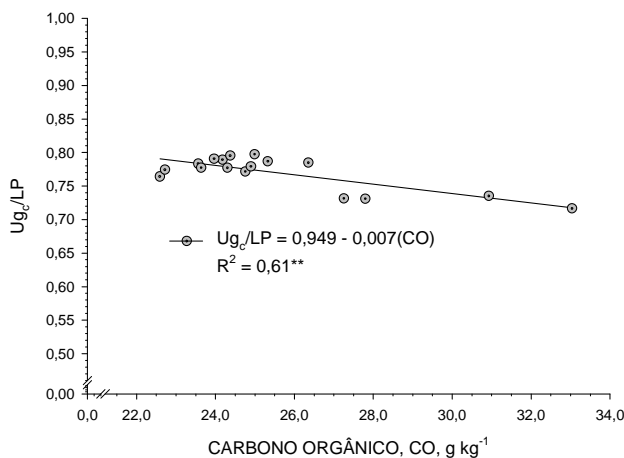


Figura 5. Razão entre a umidade crítica para compactação (U_{g_c}) e o limite de plasticidade (LP), considerando o teor de carbono orgânico do solo de um Nitossolo Vermelho distrófico (modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).**

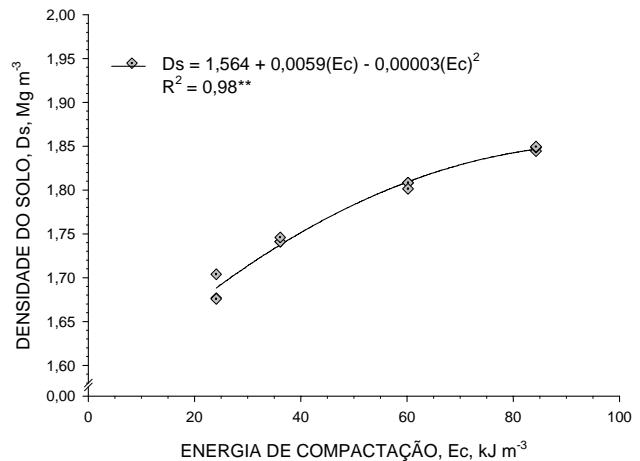


Figura 6. Densidade do solo, considerando a energia de compactação utilizada no ensaio Proctor, para um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico com umidade gravimétrica de 0,05 kg kg⁻¹ (modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).**

(36,1 kJ m⁻³), foi o linear. Entretanto, considerando que a densidade do solo nunca será menor que a inicial, ou seja, a quantidade de palha sobre o solo poderá até dissipar toda a E_c e, mesmo assim, a densidade inicial não irá diminuir, entende-se que o modelo linear deva ser preterido em relação ao modelo exponencial.

Com base nos valores de D_s obtidos e usando-se a equação que descreve a relação D_s vs E_c (Figura 6), calculou-se a energia de compactação equivalente para cada tratamento e, depois, estimou-se a percentagem de energia dissipada pela palha existente na superfície do solo (Quadro 3). Analisando os resultados, percebe-se que, para as menores quantidades de palha (2, 4 e 8 Mg ha⁻¹), a palha foi mais efetiva em dissipar a energia de compactação quando a energia foi maior. Talvez isso tenha relação com o fato de o ensaio Proctor ser realizado com o solo desagregado e, principalmente, pouco denso. Assim, nos golpes iniciais do soquete, o solo está quase tão susceptível à deformação quanto a palha e, portanto, nesses golpes, a compactação é quase que indiferente à presença da palha, especialmente quando em quantidades muito pequenas. Nos golpes finais, o solo já está mais compactado, enquanto a palha continua muito susceptível à deformação, passando a funcionar como amortecedor entre o soquete que cai e o solo. Nos ensaios realizados, os dois níveis de energia foram obtidos pela diferenciação do número de golpes do soquete (15 golpes para $E_c = 36,1$ kJ m⁻³ e 25 golpes para $E_c = 60,2$ kJ m⁻³). Assim, considerando, por exemplo, a dose de 2 Mg ha⁻¹ de palha, vê-se que, nos primeiros 15 golpes (correspondentes a uma E_c de 36,1 kJ m⁻³), houve a dissipação de apenas 2,9 % da E_c e que esse percentual subiu para 14,9, quando se utilizou a maior E_c , indicando que houve dissipação de 12 % da E_c nos 10 golpes finais.

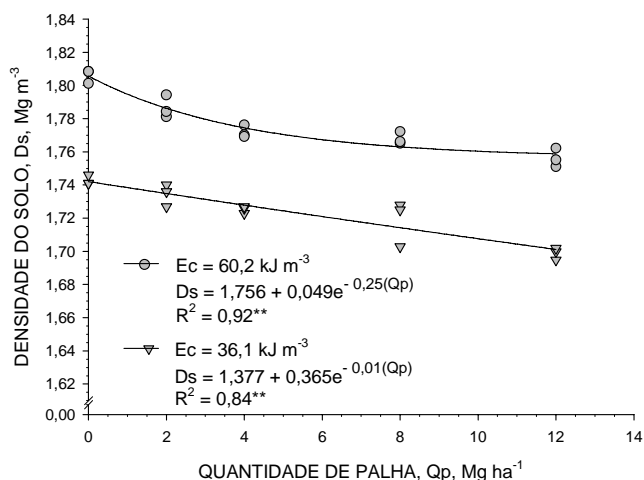


Figura 7. Densidade do solo, considerando a quantidade de palha existente sobre o solo e a energia de compactação usada no ensaio Proctor, para um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (** modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).

A maior quantidade de palha aplicada sobre a superfície do solo foi capaz de dissipar a energia de compactação mesmo nos golpes iniciais, tendo sido mais eficaz em reduzir a compactação no nível mais baixo de energia. Com a dose de 12 Mg ha⁻¹ de palha, a dissipação de energia atingiu 26,6 % nos primeiros 15 golpes e, nos 10 restantes, apenas 4,7 %.

Os resultados aqui apresentados confirmam as observações feitas por Acharya & Sharma (1994) e Dao (1996), cujos resultados mostraram que a densidade do solo foi menor quando sobre o mesmo havia resíduos vegetais. Confirmam, ainda, as suposições de Silva et al. (2000), que creditaram aos resíduos vegetais presentes sobre o solo durante o pastoreio o pouco efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo.

CONCLUSÕES

1. O acúmulo de matéria orgânica, proporcionado por diferentes sistemas de manejo do solo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo, significando que ele se tornou mais resistente à compactação. A magnitude desses efeitos, contudo, foi dependente da granulometria do solo.

2. A presença de palha sobre o solo, durante a realização do ensaio Proctor, resultou em dissipação de parte da energia de compactação utilizada, com redução da densidade máxima obtida, confirmando a hipótese de que a palha existente sobre o solo foi capaz de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e animais. A eficácia dessa capacidade, no entanto, dependeu da quantidade de palha, da energia aplicada e das condições do solo.

Quadro 3. Densidade do solo (Ds), energia equivalente (Ee) e energia dissipada (Edi), considerando a quantidade de palha existente sobre o solo e a energia de compactação (Ec) usada no ensaio Proctor. Médias de três repetições

Ec	Palha	Ds	Ee	Edi	
kJ m ⁻³	Mg ha ⁻¹	Mg m ⁻³	kJ m ⁻³	%	
84,3	0	1,847	84,3	100,0	0,0
60,2	0	1,806	60,2	100,0a ⁽¹⁾	0,0a
	2	1,787	51,2	85,1b	14,9a
	4	1,772	46,2	76,7b	23,3a
	8	1,768	44,9	74,6b	25,4a
	12	1,756	41,4	68,7a	31,3a
36,1	0	1,743	36,1	100,0a	0,0a
	2	1,734	35,3	97,1a	2,9b
	4	1,725	32,9	91,2a	8,8b
	8	1,719	31,3	86,6a	13,4b
	12	1,699	26,5	73,4a	26,6a
24,1	0	1,685	24,1	100,0	0,0

⁽¹⁾ Letras iguais indicam médias iguais pelo teste DMS com 5 % de significância, para comparação de médias entre os dois níveis de energia em cada nível de palha.

LITERATURA CITADA

- ACHARYA, C.L. & SHARMA, P.D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. *Soil Till. Res.*, 32:291-302, 1994.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.
- ARAGÓN, A.; GARCÍA, M.G.; FILGUEIRA, R.R. & PACHEPSKY, Y.A.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil Till. Res.*, 56:197-204, 2000.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. *Soil Till. Res.*, 49:159-170, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7180/84 Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7182/86 Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459/84 Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J. & HUNTER, E.A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Till. Res.*, 57:83-91, 2000.
- BAUMGARTL, T. & HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil Till. Res.*, 19:203-213, 1991.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. *Soil physics*. 4.ed. New York, John Wiley & Sons, 1972. 498p.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETREIRE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:121-126, 1995.
- CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A. & AMARAL, N.B.M. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508p.
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:99-105, 1990.
- DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. *Agron. J.*, 88:141-148, 1996.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- EKWUE, E.I. & STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 40:317-323, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, Embrapa, 1979. 412p.
- FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:487-493, 2000.
- GIACOMINI, S.J. Consorciação de plantas de cobertura no outono/inverno e fornecimento de nitrogênio ao milho em sistemas plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2001. (Tese de Mestrado)
- GUPTA, S.C.; SCHNEIDER, E.C.; LARSON, W.E. & HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 51:207-212, 1987.
- ISMAIL, I.; BLEVINS, R.L. & FRYE, W.W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:193-198, 1994.
- MACHADO, J.A. & BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:81-84, 1978.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:369-374, 1991.
- MEURER, E.J.; RHENHEIMER, D. & BISSANI, C.A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. Porto Alegre: Gênese, 2000. 174p.
- OJENIYI, S.O. & DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostructured produced by tillage. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 22:339-343, 1979.
- RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E.; AMIR, I.; CHASSE, M. & BROUGHTON, N.S. Prediction of compaction due to off-road vehicle traffic. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 19:610-613, 1976.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:91-95, 1986.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:191-199, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:9-15, 2002.
- STONE, R.J. & EKWUE, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 36:1713-1719, 1993.
- VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.
- VEIGA, M.; PANDOLFO, C.M. Técnicas melhoradas de manejo de resíduos de colheita e outros insumos orgânicos para uma agricultura sustentável. Campos Novos, EPAGRI-EECN. 1998 (Projeto de Pesquisa)
- ZHANG, H.; HARTGE, K.H. & RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245, 1997.