

Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados

João Tavares Filho⁽¹⁾, Clarissa Tieme Matsuda Feltran⁽¹⁾, José Francirlei de Oliveira⁽¹⁾, Edinei de Almeida⁽¹⁾ e Maria de Fátima Guimarães⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Caixa Postal 6001, CEP 86051-990 Londrina, PR. E-mail: tavares@uel.br, clarissatieme@hotmail.com, jfoliveira79@yahoo.com, edineialm@gmail.com, mfatima@uel.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi identificar atributos de solo importantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. Para a identificação dos atributos, utilizou-se a regressão múltipla “stepwise” em dados coletados de Latossolo Vermelho eutrófico, cultivado em sistema de plantio direto. Para a obtenção dos modelos de estimativa do índice de estabilidade de agregados (I_{eaE}), foram analisadas dez variáveis independentes: argila total, densidade do solo, resistência à penetração, matéria orgânica, pH em água, capacidade efetiva de troca de cátions, água disponível, volume total de poros, macroporosidade e umidade gravimétrica. Os atributos argila total (Arg), densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), matéria orgânica (MO) e pH são os mais importantes para a estimativa do I_{eaE} , e a função de pedotransferência que melhor descreve esse índice é: $I_{eaE} = 27,80 + 0,04Arg + 27,97Ds + 12,35RP + 0,45MO - 9,72pH$ ($R^2 = 0,89$).

Termos para indexação: agregação, estrutura do solo, função de pedotransferência, modelagem, plantio direto, regressão múltipla.

Important soil attributes for estimating the aggregate stability index

Abstract – The objective of this work was to identify the most important soil attributes to estimate the aggregate stability index. To identify these attributes, multiple stepwise regression was used on data collected from an Eutrorthox cultivated under a no-tillage system. To obtain the prediction models for the aggregate stability index (I_{eaE}), ten independent variables were evaluated: total clay, bulk density, penetration resistance, organic matter, pH in water, effective cation exchange capacity, available water, total porosity, macroporosity, and gravimetric moisture. The attributes total clay (Arg), bulk density (Ds), penetration resistance (RP), organic matter (MO), and pH are the most important for the estimation of the I_{eaE} , and the pedotransfer function that best describes this index is: $I_{eaE} = 27.80 + 0.04Arg + 27.97Ds + 12.35RP + 0.45MO - 9.72pH$ ($R^2 = 0.89$).

Index terms: aggregation, soil structure, pedotransfer function, modelling, no-tillage, multiple regression.

Introdução

A estabilidade de agregados é um atributo físico importante para o manejo e o estudo da qualidade física dos solos, uma vez que está relacionada a diversos atributos físicos, químicos e biológicos, e exerce influência direta sobre a movimentação de água, a transferência de calor, a aeração, a densidade e a porosidade do solo, bem como a resistência à penetração de raízes e o selamento e encrostamento superficial do solo (Sá et al., 2000; Calegari et al., 2006; Tavares Filho & Tessier, 2009). Como esse atributo é influenciado pelo manejo do solo, é importante que se quantifique sua sensibilidade a práticas de manejo, para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter & Youngs, 1992).

O manejo com revolvimento do solo pode ter forte impacto sobre a sua estrutura (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999; Domingos et al., 2009). O sistema plantio direto é considerado como alternativa viável para a preservação ou até o incremento da matéria orgânica no solo e tem promovido melhorias em sua agregação (Dexter & Youngs, 1992; Domingos et al., 2009; Braida et al., 2010), com consequente aumento da estabilidade de agregados e da proporção relativa de macroagregados no solo.

Segundo Castro Filho et al. (1998), para a determinação do tamanho dos agregados e do estado de agregação do solo, podem ser usados parâmetros como: diâmetro médio ponderado (DMP), que está diretamente relacionado à percentagem de agregados grandes, retidos nas peneiras com malhas maiores;

diâmetro médio geométrico (DMG), que representa a estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência; e índice de estabilidade dos agregados (Iea), que representa uma medida da agregação total do solo e não considera a distribuição de agregados por classes de tamanho. De acordo com esses autores, apesar de existirem outros métodos para avaliar a qualidade dos agregados do solo, esses três índices já servem para monitorar características físicas, químicas e biológicas do solo.

A estabilidade dos agregados depende de forças que ligam as partículas (agregantes) e da natureza e da magnitude das forças desagregantes aplicadas ao solo (Beare & Bruce, 1993; Sá et al., 2000; Llanillo et al., 2006). Portanto, os mecanismos de formação das diferentes classes de tamanho de agregados podem ser influenciados pelo manejo e por várias características e propriedades do solo, como textura, densidade, resistência à penetração, teor de matéria orgânica, pH em água, capacidade de troca de cátions, água disponível, volume total de poros, macroporosidade e umidade do solo.

A avaliação do Iea exige tempo e equipamentos específicos, nem sempre disponíveis nos laboratórios. Para a sua determinação, é necessário preparar adequadamente a amostra a ser analisada. Esse processo compreende as fases de peneiramento da amostra no campo e de molhamento uniforme no laboratório, antes do tamisamento em triplicata (Castro Filho et al., 1998). Assim, a obtenção do Iea, para diferentes manejos e solos, pode tornar-se morosa e difícil. No entanto, as funções de pedotransferência permitem estimar características do solo de difícil determinação ou de custo elevado, obtidas a partir de dados disponíveis de propriedades básicas do solo, de determinação mais fácil. Contudo, o modelo é uma simplificação da condição real; portanto, para que haja maior aplicabilidade e precisão nos resultados estimados, é necessário que se identifiquem os atributos do solo com influência sobre o índice.

O objetivo deste trabalho foi identificar atributos de solo importantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados, em um Latossolo Vermelho.

Material e Métodos

Os dados foram coletados em uma área de 20 ha, localizada na região norte do Estado do Paraná (latitudes entre 23°08'47" e 23°55'46"S, e longitudes entre 50°52'23" e 51°19'11"W, a 603 m de altitude).

O clima do local é do tipo Cfa, segundo Köppen, subtropical úmido, com chuvas em todas as estações (pluviometria anual em torno de 1.260 mm). O solo, classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) (Santos et al., 2006), foi cultivado no sistema plantio direto (soja/milho e trigo/aveia) desde 1995, com teor de argila, na camada de 0 a 0,5 m, entre 641 e 705 g kg⁻¹.

Antes da coleta das amostras para determinação dos atributos estimadores do índice de estabilidade de agregados, realizou-se estudo prévio para determinar o número ideal de amostras a serem coletadas. Dois tipos de amostragens têm sido utilizados em estudos de avaliação da qualidade física do solo (Ribon & Tavares Filho, 2008): ao acaso ou clássica, em que as amostras são retiradas de uma população sem seguir critérios definidos; e a sistemática, em que é estabelecido um plano criterioso de coleta, de acordo com uma rede preestabelecida de pontos de amostragem, para a obtenção de maior representatividade da área. De acordo com Clay et al. (1999), a intensidade de amostragem ideal, para ambientes, usos e manejos variados, deve ser tal que permita aumentar a probabilidade de estabelecer corretamente as relações de causa e efeito.

A coleta foi realizada de acordo com uma rede de pontos (amostragem sistemática). O centro da área de estudo, com declive médio de 6%, foi demarcado com quadrados de 50 m de lado, para boa representatividade da área e independência das observações. Nos vértices dos quadrados, bem como no centro, foram realizadas amostragens para determinação direta do índice de estabilidade de agregados. O número ideal de amostras foi determinado por meio da fórmula $n = (t_{\alpha}^2 \times S^2)/D^2$, em que: n é o número de amostras; t é o valor tabelado de t , em função da significância estatística (α) e do número de graus de liberdade usados para estimar a variância amostral; S é o desvio-padrão da amostra; e D é o produto da média (m) pela percentagem de variação em torno da média (Petersen & Calvin, 1965). Foram considerados 10% de variação em torno da média e coeficiente de confiança ($1 - \alpha$) de 99%. Assim, o número ideal de amostras a ser coletado para a estimativa confiável do índice de estabilidade de agregados foi de 76 amostras, coletadas no pleno florescimento da soja, na profundidade de 0–0,2 m.

Para os atributos do solo estimadores do índice, a amostragem também foi feita na época de

pleno florescimento da cultura da soja, na mesma profundidade, com o total de 76 amostras, coletadas nos mesmos locais.

A estabilidade de agregados foi determinada por meio do método de Yoder (1936), com adaptação de Castro Filho et al. (1998), relativa à inclusão de amostras que passassem pela peneira de malha 8,0 mm (Pen8). Em seguida, o conteúdo das peneiras de malhas 4,0, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm de diâmetro foi determinado em tamisagem a úmido. O índice de estabilidade de agregados foi calculado pela equação $Iea = [PAS - wp_{25} - (areia/PAS) \cdot areia] \times 100$, em que: wp_{25} é a massa de matéria seca dos agregados da classe <0,25 mm e PAS é a massa da amostra seca. No presente trabalho, a quantidade de areia foi desprezada, uma vez que a quantidade de partículas maiores que 2,0 mm (cascalhos) foi insignificante e o coeficiente de variação das amostras em triplicata no tamisador foi maior que 5%, o que superava o valor médio da massa da fração areia. Além disso, segundo Larach et al. (1984), em solos originários de basalto, a maioria das partículas com o tamanho de areia consiste, na realidade, de concreções de ferro e de magnetita.

A resistência do solo à penetração foi obtida com a utilização de penetrômetro de impacto, com transformação dos dados de impactos dm^{-1} para resistência dinâmica (MPa), conforme Stolf (1991): $RP (kgf\ cm^{-2}) = 5,6 + 6,89 N(\text{impactos } dm^{-1})$. Para a conversão de RP em MPa, multiplicou-se o resultado obtido em $kgf\ cm^{-2}$ pela constante 0,0981.

A densidade do solo, o teor de matéria orgânica, o pH em água e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 foram determinados de acordo com Claessen (1997). O teor de argila foi determinado após oxidação da matéria orgânica (Tavares-Filho & Magalhães, 2008). A determinação da macroporosidade e da porosidade total foi feita em amostras de solo indeformadas, após aplicação, em mesa de tensão, de potencial matricial de -0,006 MPa. A porosidade total foi obtida segundo a expressão: $VTP (m^3\ m^{-3}) = (Massa_{\text{solo saturado}} - Massa_{\text{solo seco em estufa}}) / \text{volume total (tendo-se considerado } 1,0\ g\ de\ água = 1,0\ cm^3)$, e a macroporosidade foi obtida conforme a expressão: $Ma (m^3\ m^{-3}) = (M_{\text{solo saturado}} - M_{\text{sucção } 0,06\ m}) / \text{volume total}$. Ainda nas amostras indeformadas, foi determinada a água disponível (Ritchie, 1981) em extratores de placas de cerâmica

por secamento, pela diferença entre o teor de umidade nos potenciais de -0,033 e -1,5 MPa.

Para a obtenção dos modelos de estimativa do índice de estabilidade de agregados como variável dependente (Iea_E), foram avaliadas dez variáveis independentes: argila total (Arg), densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), matéria orgânica (MO), pH em água (pH), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC_{pH7}), água disponível (AD), volume total de poros (VTP), macroporosidade (Ma) e umidade gravimétrica (Ug). Primeiramente, foram desenvolvidos modelos para avaliar o efeito de cada variável independente com distribuição normal (x_1, x_2, \dots, x_n) sobre o Iea_E , para, em seguida, desenvolver as equações múltiplas com uso da regressão múltipla "stepwise" ($Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$), com as variáveis independentes significativas a 5% de probabilidade, pelo teste F. Segundo Lee & Koval (1997), o nível de significância de 5% deve ser considerado como bem rigoroso e permite incluir, no modelo final, somente variáveis que influem decisivamente na variável dependente em estudo.

Uma vez estabelecidos os modelos múltiplos para a estimativa do Iea_E , para a profundidade amostrada, em um mesmo manejo e solo, as médias de Iea obtidas em campo e as estimadas a partir desses modelos (Iea_E) foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em seguida, o modelo com maior coeficiente de determinação (R^2) foi selecionado, e construiu-se um gráfico com os valores estimados e absolutos do índice, para verificar a correlação entre os resultados obtidos, bem como para avaliar os desvios entre os dados estimados e determinados. Para isso, utilizou-se o erro relativo absoluto médio (ε), conforme Khoury Júnior et al. (2004): $\varepsilon = (100/n) \sum_{i=1}^n (|Y - Y_0|/Y)$ em que: Y é o valor observado experimentalmente; Y_0 é o valor calculado pelos modelos; e n é o número de observações experimentais. A simulação foi considerada boa (ajustes mais adequados aos dados experimentais) quando $\varepsilon < 10$; e ruim (ajustes menos adequados aos dados experimentais) quando $\varepsilon \geq 10$ (Mohapatra & Rao, 2005).

Os efeitos de multicolinearidade foram testados por meio do fator de incremento de variância (VIF), tendo-se considerado os valores de VIF menores que 10 como indicativos de ausência de efeito da multicolinearidade sobre a regressão (Neter et al., 1989). No presente

trabalho, todas as variáveis que participaram dos modelos finais apresentaram valores de VIF menores que 10.

Resultados e Discussão

O solo em estudo apresentou valores de I_{ea} indicativos de boa estruturação, entre 50,04 e 93,43%, com média de agregação de 73,05% e coeficiente de variação igual a 16,6% (Tabela 1). Esse resultado difere dos de Ribon & Tavares Filho (2008), que constataram elevado coeficiente de variação (>30%) para agregação do solo, ao avaliar o efeito de sistemas de manejo sobre propriedades físicas do solo.

Para a estimativa do índice de estabilidade de agregados a partir dos atributos do solo, verificou-se, inicialmente, o efeito de cada variável independente no I_{ea} (equações

1 a 10), para, em seguida, desenvolver as equações múltiplas (equações 11 a 14), com uso apenas das variáveis independentes significativas (Tabela 2).

Observou-se que, de todas as variáveis independentes, somente cinco (Arg, Ds, RP, MO e pH) foram significativas e devidamente incluídas nos modelos lineares simples para estimativa do I_{ea} (Tabela 2). Dessas cinco variáveis, Arg, Ds e RP apresentaram maior valor de R^2 (0,60), quando consideradas isoladamente.

Assim, a primeira equação múltipla desenvolvida (equação 11) considerou as variáveis independentes Arg, Ds e RP. Verificou-se que somente a presença dessas três variáveis na mesma equação foi suficiente para elevar o valor do R^2 para 83% (Tabela 2). Na sequência, ao se observar as equações 12, 13 e 14, notou-se que a inclusão das variáveis MO, pH e de todas as variáveis significativas

Tabela 1. Momentos estatísticos (n = 76) para as variáveis analisadas à profundidade de 0–0,2 m, em Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto.

Momento estatístico	I_{ea} (%)	Arg (g kg ⁻¹)	Ds (Mg m ⁻³)	RP (Mpa)	MO (g dm ⁻³)	pH em H ₂ O	CTC (cmol _c dm ⁻³)	AD (m ³ m ⁻³)	Ma (m ³ m ⁻³)	VTP (m ³ m ⁻³)	Ug (kg kg ⁻¹)
Média	73,05	650	1,43	1,21	23,89	5,47	10,39	0,06	0,12	0,49	0,27
Erro-padrão	1,21	8	0,01	0,04	0,78	0,04	0,17	0,00	0,02	0,00	0,00
Mediana	79,62	654	1,40	1,22	24,00	5,40	10,08	0,05	0,12	0,50	0,27
Moda	79,62	661	1,31	1,19	21,00	5,30	10,03	0,06	0,11	0,54	0,28
Desvio-padrão	12,11	60	0,10	0,25	6,59	0,34	1,42	0,01	0,13	0,03	0,02
Mínimo	50,04	512	1,30	0,95	10,00	5,00	8,07	0,04	0,08	0,43	0,25
Máximo	93,43	758	1,69	1,75	38,00	6,45	13,64	0,08	0,15	0,56	0,31
CV (%)	16,60	9,21	7,14	22,22	27,58	6,22	13,66	19,36	20,13	6,20	5,52

I_{ea} , índice de estabilidade de agregados estimado; Arg, argila total; Ds, densidade do solo; RP, resistência do solo à penetração; MO, matéria orgânica; pH, pH em água; CTC, capacidade de troca de cátions a pH 7,0; AD, água disponível; Ma, macroporosidade; VTP, volume total de poros; Ug, umidade gravimétrica.

Tabela 2. Modelos selecionados para a estimativa do índice de estabilidade de agregados (I_{ea}) à profundidade de 0–0,2 m, em Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto.

Modelo	Equação	R^2	EP	Teste F
1	$I_{ea} = -40,68 + 0,18Arg$	0,60	9,47	*
2	$I_{ea} = -20,17 + 62,79Ds$	0,60	9,33	*
3	$I_{ea} = 9,75 + 42,74RP$	0,60	9,46	*
4	$I_{ea} = 33,67 + 1,83MO$	0,59	9,88	*
5	$I_{ea} = 248,08 - 31,62pH$	0,53	10,02	*
6	$I_{ea} = 31,88 + 4,17CTC$	0,20	11,67	ns
7	$I_{ea} = 22,39 + 954,72AD$	0,17	12,80	ns
8	$I_{ea} = -15,56 + 187,76VTP$	0,10	17,00	ns
9	$I_{ea} = -10,71 + 175,11Ma$	0,12	15,90	ns
10	$I_{ea} = 81,49 - 23,11Ug$	0,10	19,90	ns
11	$I_{ea} = -50,56 + 0,07Arg + 35,08Ds + 18,94RP$	0,83	6,26	*
12	$I_{ea} = -39,18 + 0,05Arg + 28,61Ds + 14,84RP + 0,68MO$	0,87	5,30	*
13	$I_{ea} = 43,12 + 0,05Arg + 31,36Ds + 13,82RP - 12,86pH$	0,88	5,18	*
14	$I_{ea} = 27,80 + 0,04Arg + 27,97Ds + 12,35RP + 0,45MO - 9,72pH$	0,90	4,82	*

^{ns}Não significativo. *Significativo pelo teste F, a 5% de probabilidade. EP, erro padrão da regressão; Arg, argila total; Ds, densidade do solo; RP, resistência do solo à penetração; MO, matéria orgânica; pH, pH em água; CTC, capacidade de troca de cátions a pH 7,0; AD, água disponível; Ma, macroporosidade; VTP, volume total de poros; Ug, umidade gravimétrica.

continuou a aumentar os valores de R^2 , que passaram de 83% para 87%, pela inclusão da variável MO (equação 12); 88%, pela inclusão da variável pH (equação 13); e 90%, quando foram consideradas as cinco variáveis. Portanto, a equação 14 foi a escolhida para estimar o índice de estabilidade de agregados.

A influência positiva da argila e da matéria orgânica na agregação do solo é conhecida e estudada na literatura (Castro Filho et al., 1998; Ribon & Tavares Filho, 2008), o que está de acordo com os valores do coeficiente de correlação encontrados no presente trabalho (R^2)^{0,5}. As correlações significativas de Arg, MO e pH com o Iea_E podem ser atribuídas à contribuição desses atributos para a floculação e, posteriormente, a cimentação das partículas de solo.

A presença do pH no modelo final para a estimativa do Iea_E era esperada, pois trabalhou-se com um solo intemperizado, com cargas dependentes do pH. A caulinita, associada a íons como Ca, Mg e Al, e a óxidos, principalmente os de Fe, induz a formação de agregados mais estáveis (Goldberg et al., 1990; Ferreira et al., 1999).

Cabe ressaltar a importância dos atributos Ds e RP na agregação do solo. Os resultados obtidos (equações 2 e 3) estão em acordo com a literatura (To & Kay, 2005; Dexter et al., 2007; Ribon & Tavares Filho, 2008). Sabe-se que a RP é influenciada pela Ds e, na maioria dos sistemas de plantio direto, a ausência de preparo por longo tempo eleva a densidade do solo e a estabilidade dos agregados na superfície (Costa et al., 2003).

Em relação aos valores estimados pela equação 14, verificou-se que os pontos estimados estão próximos dos valores reais determinados pela análise de laboratório (Figura 1), como pode ser observado pela dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 (Zhuang et al., 2001). Além disso, o intervalo de confiança (95%) não foi expressivo, indício de que o modelo obtido permite boa compreensão e estimativa do índice de estabilidade de agregados para o solo considerado, sob plantio direto.

Em relação aos desvios entre os dados estimados pelo modelo e os experimentais, verificou-se que os erros relativos absolutos médios ($\varepsilon = 5,81$) foram adequados para a descrição da RP (Figura 1), pois foram menores que 10% (Mohapatra & Rao, 2005).

Se considerarmos que o índice de estabilidade de agregados é uma propriedade do solo influenciada por uma série de atributos e pelo manejo do solo, as estimativas desse atributo pela regressão múltipla “stepwise” possibilitaram bom ajuste, tendo em vista os valores de R^2 e ε .

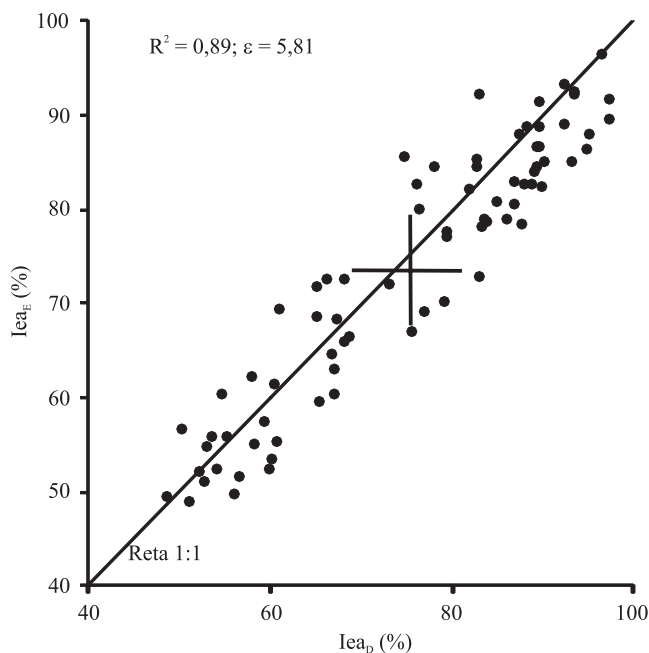


Figura 1. Relação entre os valores de índice de estabilidade de agregados determinados diretamente (Iea_D) e os estimados a partir da equação $Iea_E = 27,80 + 0,04Arg + 27,97Ds + 12,35RP + 0,45MO - 9,72pH$, para Latossolo Vermelho sob semeadura direta. A cruz formada por barra horizontal e vertical representa o intervalo de confiança de 95%. ε , erro relativo absoluto médio.

Conclusões

1. Os atributos argila total, densidade do solo, resistência do solo à penetração, matéria orgânica e pH em água são os mais importantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados, em Latossolo Vermelho sob plantio direto.

2. É possível estimar o índice de estabilidade de agregados com boa precisão a partir do uso dessas variáveis em modelo de regressão múltipla “stepwise”.

Referências

- BEARE, M.H.; BRUCE, R.R. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma*, v.56, p.87-104, 1993.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; VEIGA, M. da. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.

- CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C. de; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. de F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v.27, p.147-158, 2006.
- CASTRO FILHO, C. de; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538, 1998.
- CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).
- CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; CHANG, J.; CLAY, S.A.; MALO, D.D. Systematic evaluation of precision farming soil sampling requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1999, Madison. **Proceedings**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1999. p.253-265.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.527-535, 2003.
- DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, v.93, p.412-419, 2007.
- DEXTER, A.R.; YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. **Soil and Tillage Research**, v.24, p.101-106, 1992.
- DOMINGOS, M.M.M.; GASPARETTO, N.V.L.; NAKASHIMA, P.; RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. Estrutura de um Nitossolo Vermelho latossólico eutroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e floresta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1517-1524, 2009.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.507-514, 1999.
- GOLDBERG, S.; KAPOOR, B.S.; RHOADES, J.D. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. **Soil Science**, v.150, p.588-593, 1990.
- KHOURY JÚNIOR, J.K.; DIAS, G.P.; CORDEIRO, R.R.; SOUZA, C.M.A. de. Modelagem da estabilidade de tratores agrícolas de pneus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.459-468, 2004.
- LARACH, J.O.I.; CARDOSO, A.; CARVALHO, A.P. de; HOCHMULLER, D.P.; MARTINS, J.S.; RAUEN, M. de J.; FASOLO, P.J.; POTTER, R.O. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR; Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS, 1984. 414p. (IAPAR. Boletim técnico, 16; Embrapa-SNLCS. Boletim técnico, 27).
- LEE, K.I.; KOVAL, J.J. Determination of the best significance level in forward stepwise logistic regression. **Communications in Statistics – Simulations and Computations**, v.26, p.559-575, 1997.
- LLANILLO, R.F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. de F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, v.27, p.205-220, 2006.
- MELLO IVO, W.M.P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.135-143, 1999.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, p.513-518, 2005.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M.H. **Applied linear regression models**. 2.ed. Homewood: R. Irwin, 1989. 245p.
- PETERSEN, R.G.; CALVIN, L.D. Sampling. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.54-71. (ASA. Agronomy, 9).
- RIBON, A.A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1817-1825, 2008.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, v.58, p.327-338, 1981.
- SÁ, M.A.C. de; LIMA, J.M. de; SILVA, M.L.N.; DIAS JUNIOR, M. de S. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1825-1834, 2000.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmula de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-235, 1991.
- TAVARES-FILHO, J.; MAGALHÃES, F.S. de. Dispersão de amostras de Latossolo Vermelho eutroférico influenciadas por pré-tratamento para oxidação da matéria orgânica e pelo tipo de agitação mecânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1429-1435, 2008.
- TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1837-1844, 2009.
- TO, J.; KAY, B.D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, v.126, p.261-276, 2005.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.
- ZHUANG, J.; JIN, Y.; MIYAZAKI, T. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. **Soil Science**, v.166, p.308-321, 2001.