

# Zonas de Manejo da Compactação do Solo

## Areas of Management of Soil Compaction

Léo Adriano Chig<sup>a\*</sup>; Evaldo Ferraz de Oliveira<sup>b</sup>; Alessandra Bittencourt Crestani<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidade de Cuiabá, MT, Brasil

<sup>b</sup>Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Química, MT, Brasil

\*E-mail: leochig@gmail.com

---

### Resumo

O objetivo deste trabalho foi identificar zonas de manejo para a descompactação do solo utilizando-se de diferentes implementos de revolvimento de solo, conforme sua atuação em profundidade. O estudo foi realizado em um talhão comercial de produção de soja inserido no cerrado mato-grossense, localizado na região de Deciolândia (MT). A avaliação da resistência à penetração do solo foi realizada em esquema de malha fixa de 60 metros, nas profundidades de zero a 0,50 m, com auxílio de um penetrômetro de impacto, após a colheita da soja. A análise estatística foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, foi empregada a análise descritiva dos dados e na segunda, foi aplicada a análise geoestatística. Comparando a recomendação de descompactação baseada na estatística descritiva (subsologema a 40 cm de profundidade em toda a área) com a decorrente da análise das zonas de manejo identificadas pelo uso da Geoestatística, observou-se que a primeira superestimaria a área a ser descompactada em 36,7% e seria ineficaz em 6%, resultando em maiores custos e em menor produtividade.

**Palavras-chave:** Penetrômetro de Impacto. Geoestatística. Compactação.

### Abstract

*The objective of this study was to identify management zones for soil decompaction using different soil tillage implements, as their performance in depth. The study was conducted in a commercial stand of soybean production in the savanna of Mato Grosso, located in the region of Deciolândia (MT). The penetration resistance of the soil was evaluated in a fixed grid of 60 m and 0 to 0.50 m depth, with the aid of an impact penetrometer after soybean harvest. Statistical analysis was performed in two stages. In the first step, descriptive was used, whereas geostatistical analysis was used in the second step. Comparing the decompression recommendation based on descriptive statistics (subsoiling to 40 cm depth in the whole area) and the analysis of management areas identified by the use of geostatistics, it was observed that the first overestimate the area to be decompressed in 36.7% with 6% ineffectiveness, resulting in higher costs and lower productivity.*

**Keywords:** Impact Penetrometer. Geostatistics. Compaction.

---

## 1 Introdução

A compactação do solo é um fenômeno físico que tem sido associado à diminuição da produtividade de culturas (BEUTLER; CENTURION, 2003; BEUTLER *et al.*, 2004; ROQUE *et al.*, 2008). Causada por tensões que surgem na interface solo/pneu e solo/implemento, pela aplicação de cargas dinâmicas ao solo, por rodados e implementos agrícolas durante o manejo (FLOWERS; LAL, 1998; SILVA *et al.*, 2003), ela se caracteriza pela aglutinação das partículas primárias do solo, mudanças em propriedades físicas relacionadas ao volume de espaço vazio do solo, redução do crescimento e da distribuição de raízes e suas consequências (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002; SILVA *et al.*, 2003; STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996).

A compactação do solo de áreas de cultivo não é uniforme e depende de fatores externos (tipo, intensidade e frequência de carga aplicada) e internos (umidade, textura, estrutura, teor de carbono, densidade inicial do solo e histórico de tensões) ao solo (RICHART *et al.*, 2005). A profundidade de compactação varia com o sistema de manejo do solo, sendo superficial para

o sistema de plantio direto (8 a 15 cm) e subsuperficial para os sistemas de preparo mínimo e convencional (>20 cm) (CENTURION; DEMATTÊ, 1985; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

O rompimento de camadas subsuperficiais de solo compactado pode ser feito com o auxílio de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo (FOLONI; LIMA BÜL, 2006; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007) ou pode ser realizado periodicamente com o auxílio de grades (grade aradora), arados (profundidade  $\leq 20$  a 25 cm) escarificadores (profundidade  $\leq 30$  cm) ou subsoladores (profundidade  $\geq 30$  cm) (BOLLER, 2001; CAMARGO; ALLEONI, 1997; CASTRO, 1985), desde que alcancem uma profundidade imediatamente abaixo de seu limite inferior (EMBRAPA, 2004).

Os conjuntos trator+implemento, necessários para realizar as operações de aração, escarificação e subsolagem apresentam capacidades de campo efetivas (CCE) e consumo horário de combustíveis diferentes (SALVADOR; MION; BENEZ, 2009). A subsolagem é a operação com maior custo financeiro e o conjunto trator+subsolador possui uma CCE que diminui com o aumento da profundidade de trabalho

(GAMERO, 2008). Estes fatos magnificam a importância de se desenvolver procedimentos expeditos para a localização e o dimensionamento de camadas compactadas, ou seja, zonas de manejo específico do estado de compactação do solo.

A resistência do solo à penetração (RSP) tem sido usada como um indicador do estado de compactação de solos cultivados em relação à sua condição natural (SILVA *et al.*, 2004). Para um mesmo solo, quanto maior a densidade, maior também será a resistência à penetração e menor a macroporosidade (MONTANARI *et al.*, 2012). Além disso, o aumento da resistência à penetração do solo pode induzir alterações na absorção e concentração de nutrientes nas plantas e, conseqüentemente, afetar seu desenvolvimento (FAGUNDES; SILVA BOMFIM-SILVA, 2014).

A RSP reflete a variação da coesão entre as partículas sólidas do solo, e depende do teor de água e da textura do solo, embora não exista consenso na literatura sobre os valores de RSP restritivos ao crescimento e desenvolvimento radicular (RICHART *et al.*, 2005; REICHERT *et al.*, 2007), sendo que vários pesquisadores têm adotado o valor de 2MPa como o limite crítico (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966; TORMENA; ROLLOFF, 1996).

A geoestatística é uma ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial e possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (VIEIRA *et al.*, 2002). Após a quantificação da dependência espacial de um atributo (determinação do efeito pepita, variância estrutural e alcance) e o ajuste de um modelo matemático ao semivariograma experimental, procede-se a estimativa de valores do atributo do solo para locais não amostrados, por meio de uma técnica de interpolação denominada krigagem. Através da krigagem, é possível gerar mapas da área de interesse (GONÇALVES *et al.*, 2001).

Através dos mapas pode-se descrever a variabilidade de atributos de interesse, e essa condição têm constituído a base de informações para a análise da produtividade agrícola por intermédio da avaliação de mapas como os de colheita, que proporcionam a compreensão das causas de variação da qualidade da produção de culturas agrícolas em um talhão comercial (AMADO *et al.*, 2007; MOLIN, 1997).

A elaboração de mapas, descrevendo a variabilidade da RSP, pode permitir que sua análise e interpretação se constituam em valiosa ferramenta de apoio para decisões gerenciais, visando a otimização do uso de equipamentos agrícolas que compõem o sistema mecanizado, o aumento da capacidade efetiva de trabalho, a economia de combustíveis, o cumprimento do cronograma de trabalho e, conseqüentemente, a melhoria contínua do processo produtivo.

Considerando as premissas citadas acima, o objetivo

do presente trabalho foi a identificação de zonas para o manejo específico do estado de compactação do solo de uma área de cultivo, considerando a maior profundidade onde a resistência do solo à penetração encontrava-se acima de 2 MPa, para indicação do implemento agrícola mais adequado ao rompimento da camada compactada do solo.

## 2 Material e Métodos

O trabalho foi realizado em um talhão de 249 ha da área de produção comercial de soja de uma empresa rural, localizada na região da Deciolândia, município de Diamantino – MT, inserido no cerrado mato-grossense. O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico e apresentou teor de argila em torno de 450 g/kg. As medidas de resistência do solo à penetração foram realizadas após a colheita da soja em vértices de uma malha fixa de 60 metros, nas profundidades de 0 a 50 cm, com auxílio de um penetrômetro de impacto (STOLF *et al.*, 1983). Dada à influência do teor de água do solo na RSP, todas as medidas foram realizadas num mesmo dia e em condições de solo friável (U média = 0,030 kg/kg solo). Os dados obtidos em número de impactos por  $dm^{-1}$  foram transformados para resistência do solo à penetração (MPa), utilizando-se a equação apresentada por Stolf (1991).

Após a determinação da resistência do solo à penetração, identificou-se a profundidade máxima em que a RSP excedia ao valor limite de 2 MPa (profundidade da camada compactada), em cada ponto da malha. Posteriormente, cada profundidade foi classificada em relação ao índice de atuação (IA), ou seja, a profundidade média de revolvimento do solo de cada implemento agrícola (Quadro 1).

**Quadro 1:** Profundidade média de atuação dos implementos agrícolas considerados neste estudo e o correspondente índice de atuação

Implementos	Profundidade média de atuação (cm)	IA
(*)	-	0
Grade de disco 32"	0 a 20	1
Subsolador - 40 cm	20 a 30	2
Subsolador - 60 cm	30 a 50	3

\* Sem necessidade de descompactação do solo

A análise estatística foi realizada em duas etapas: na primeira, foi feita apenas uma descrição dos dados (estatística descritiva) enquanto que a segunda etapa compreendeu uma análise geoestatística para detecção da dependência espacial do atributo em estudo, no campo amostral, utilizando os conceitos fundamentais propostos por Matheron em 1963 e 1971 e as funções do semivariograma (Eq. 1 e 2). Nessa análise, o estimador do semivariograma é por definição (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978):

(1)

$$\rho_{\gamma}(h) = \frac{1}{2} E [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (2)$$

$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$ : o de pares experimentais de dados separados por uma distância  $h$ ;  $Z(x_i)$  é o valor determinado em cada ponto amostrado;  $Z(x_i+h)$  é o valor medido num ponto mais uma distância  $h$  (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Na análise da função semivariância, utilizou-se as seguintes interpretações: quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior é a semelhança entre eles e, portanto, menor a semivariância e menor a dispersão e vice versa (GUIMARÃES, 2001).

Uma vez determinado o semivariograma da variável em estudo, e tendo encontrado dependência espacial entre as amostras, foi feita a interpolação de valores para pontos não amostrados, sem tendência e com variância mínima, utilizando-se a krigagem (WEBSTER, 1985; VIEIRA, 2000), que considera o número de amostras utilizadas, as posições das amostras na área a serem avaliadas, as distâncias entre as amostras, a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo (ANDRIOTTI, 1988). O estimador de Krigagem é expresso matematicamente pela equação 3 (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978).

(3)

$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$  de valores medidos,  $[Z(x_0)]$ , envolvidos na estimativa, e  $\lambda_i$  são os pesos definidos para cada valor medido  $[Z(x_i)]$ .

### 3 Resultados e Discussão

**Quadro 3:** Característica do semivariograma

Modelo	Co	C0+C1	A	R <sup>2</sup>	RSQ	[C/(C0+C)]x100	Classe
Esférico	0,001	1,268	615	0,73	1,02	99,9	S

Co = Efeito Pepita, Co+C1 = Patamar, A = Alcance em metros; S = Forte dependência espacial (% efeito pepita < 25), M = Moderada dependência (25 < %efeito pepita < 75), W = Fraca dependência espacial (% efeito pepita > 75), R = Aleatória (efeito pepita puro)

**Fonte:** Cambardella *et al.* (1994).

O alcance da dependência espacial do índice de atuação para a profundidade (cm) com RSP>2 Mpa foi de 615 m, muito superior ao utilizado neste trabalho, onde as medidas de resistência do solo à penetração foram realizadas em uma malha fixa de 60 metros. Medições localizadas à distâncias maiores que o alcance tem distribuição espacial aleatória e, por isso, são independentes entre si (VIEIRA, 2000). Portanto, a distância entre as observações deve ser inferior ao alcance.

Após a caracterização da estrutura da variabilidade espacial do índice de atuação para a profundidade (cm) com RSP>2 MPa, construiu-se um mapa de isovalores através da técnica de krigagem, gerando assim, as zonas de manejo

A profundidade em que a resistência do solo à penetração (RSP) excedeu ao valor limite de 2 MPa variou consideravelmente na malha de coleta (Quadro 2). Em virtude de o solo ter atingido valores de RP superiores a 2,0 MPa, nas camadas de solo estudadas, o solo pode ser considerado compactado (CAMPOS *et al.*, 2013). E uma análise geral, baseada na estatística descritiva dos dados de profundidade com RSP >2MPa, poderia gerar uma recomendação de descompactação de toda a área de cultivo utilizando um subsolador regulado para a profundidade de 40 cm (profundidade média = 28 cm). Segundo Castro (1985), Camargo e Alleoni (1997), Boller (2001), a grade aradora e o arado não seriam eficientes para essa profundidade.

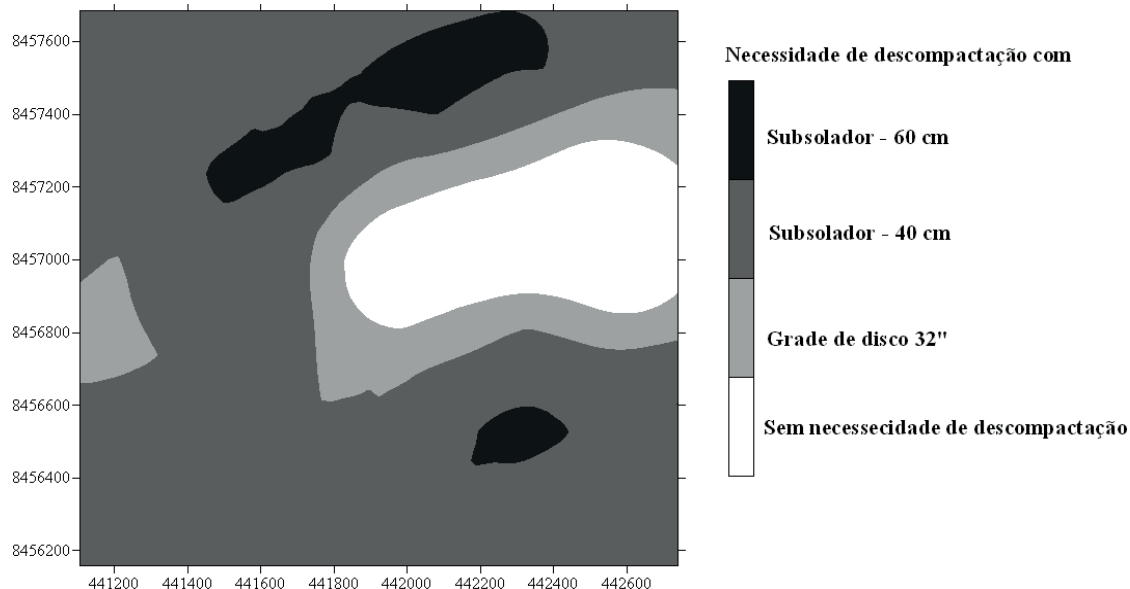
**Quadro 2:** Estatística descritiva dos dados de profundidade em cm com RSP>2 Mpa

Mínima	Média	Máxima	Amplitude	Desvio Padrão	%CV
0	28	50	50	16	57

O modelo matemático de semivariograma (Quadro 3) que melhor se ajustou aos parâmetros utilizados para caracterização da variabilidade espacial do índice de atuação, para a profundidade (cm) com RSP>2 Mpa, foi o esférico. Quando analisada a dependência espacial, utilizando a classificação de Cambardella *et al.* (1994), observou-se uma forte dependência espacial, condição que indica um ótimo potencial da interpolação dos dados utilizando a técnica de krigagem.

de descompactação do solo (Figura 1), utilizando-se, como referência, a profundidade média de atuação de diferentes implementos. A caracterização da estrutura da variabilidade espacial, segundo Ribeiro Jr. (1995), pode auxiliar na definição de estratégias de manejo desse solo, uma vez que o simples tráfego de máquinas pode alterar a resistência à penetração do solo (BERGAMIN *et al.*, 2010). Esta condição foi observada neste trabalho, considerando que a resistência à penetração do solo está relacionada ao arranjo das partículas dos solos condicionados por fatores internos, como textura, estrutura, alternância de secagem e umedecimento, e fatores externos como tráfego de máquinas e implementos, que não foram semelhantes em toda a área.

**Figura 1:** Distribuição espacial das zonas de manejo para o rompimento da camada de solo compactada.

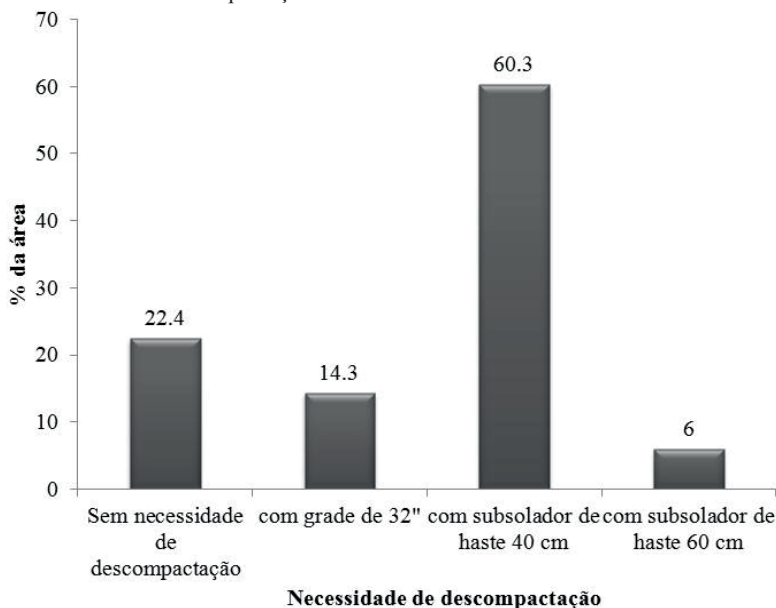


Fonte: Dados da Pesquisa

Uma análise da distribuição espacial das zonas de manejo, identificadas naquele momento, possibilitou concluir que 22,4% da área dispensava qualquer ação

visando a descompactação do solo e que 14,3% da área requeria apenas uma gradagem (grade de disco de 32”) (Figura 2).

**Figura 2:** Comparação entre as zonas de manejo em %, considerando a necessidade de descompactação do solo.



Fonte: Dados da Pesquisa

Também possibilitou concluir que, para a descompactação de 60,3% da área, seria recomendável realizar uma subsolagem à 40 cm de profundidade, e que apenas para 6% da área seria recomendável realizar uma subsolagem à 60 cm.

Comparando a recomendação de descompactação baseada na estatística descritiva (subsolagem a 40 cm de profundidade em toda a área) com a decorrente da análise das zonas de manejo identificadas pelo uso da Geoestatística,

observou-se que a primeira estaria superestimando a área a ser descompactada em 36,7% e sendo ineficaz em 6%, resultando em maiores custos e em menor produtividade.

#### 4 Conclusão

A análise dos dados experimentais de RSP x profundidade, utilizando a estatística descritiva ou a geoestatística, induziu a diferentes recomendações de procedimentos para a

descompactação do solo da área estudada.

A identificação das diferentes zonas de manejo da compactação do solo propiciou a recomendação de procedimentos mais adequados para cada situação e que, potencialmente, resultarão em menores custos operacionais e maior lucratividade para a empresa rural.

## Referências

- AMADO, T.J.C. *et al.* Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. *Pesqu. Agropec. Bras.*, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.
- ANDRIOTTI, J.L.S. *Introdução à geoestatística linear*. Porto Alegre: Companhia de Pesquisas Mineraias, 1988.
- BERGAMIN, A.C. *et al.* Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.34, n.3, p.681-691, 2010.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesqu. Agrop. Bras.*, v.38, n.7, p.849-856, 2003.
- BEUTLER, A.N. *et al.* Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesqu. Agrop. Bras.*, v.39, n.6, p.575-580, 2004.
- BOLLER, W. Cuidados com o solo. *Rev. Cultivar Máqu.*, v.5, p.06-08, 2001.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- CAMBARDELLA, C.A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M.C.C. *et al.* Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Agrária – Rev. Bras. Ciênc. Agrárias*, v.8, n.2, p.305-310, 2013.
- CASTRO, O.M. *Aspectos de manejo do solo*. Campinas: Fundação Cargill, 1985.
- CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo de solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivando soja. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.9, p.263-266, 1985.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistemas de tecnologias de produção de soja*. Região Central do Brasil 2004. Londrina, 2004.
- FAGUNDES, E.A.A.; SILVA, T.J.A.; BONFIM-SILVA, E.M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.*, v.18, n.2, p.188-193, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000200009>.
- FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Tillage Res.*, v.48, p.21-35, 1998.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L.; BÜL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.30, n.1, p.49-57, 2006.
- GAMERO, A.C. *Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“Paraplow”), em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho*. 2008. 72f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Botucatu, 2008.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, v. 23, p.1149-1157, 2001.
- GUIMARAES, E.C. *Geoestatística básica e aplicada*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. Faculdade de Matemática, Núcleo de estudos estatísticos e biométricos. Texto Didático, 2001.
- ISAACS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M., *Applied geostatistics*. New York: Oxford University, 1989.
- JENNY, H. *Factors of soil formation*. New York: McGraw-Hill, 1941.
- JOURNAL, A.C.; HUIJBREGTS, C.J., *Mining geostatistics*. London: Academic, 1978.
- KLEPER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, n.19, p.395-401, 1995.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v.58, p.1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. *The theory of regionalized variables and its application*. Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique, v.5, 1971.
- MOLIN, J.P. Agricultura de precisão. Parte II: Diagnósticos, aplicação localizada e considerações agronômicas. *Engenharia Agríc.*, v.17, p.108-121, 1997.
- MONTANARI, R. *et al.* Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de gandu com milho. *Rev. Ceres*, v.59, n.1, p.125-135, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100018>.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tóp. Ciênc. Solo*, v.5, p.49-134, 2007.
- RIBEIRO JÚNIOR, P.J. *Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo*. 1995. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. *Semin. Ciênc. Agrárias*, v.26, n.3, p.321-344, 2005.
- ROQUE, M.W. *et al.* Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.32, p.1827-1835, 2008.
- SALVADOR, N.; MION, R.L.; BENEZ, S.H. Consumo de combustível em diferentes sistemas de preparo periódico realizados antes e depois da operação de subsolagem. *Ciênc. Agrotecnol.*, v.33, n.3, p.870-874, 2009.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.
- SILVA, R.B. *et al.* O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.27, p.973-983, 2003.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ciênc. Rural*, v.34, n.2, p.399-406, 2004.
- STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, v.185, n.1, p.151-162, 1996.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.15, p.229-235, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR. *Açúc. Alcool Subprod.*, v.3, p.18-23, 1983.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Rev. Bras Eng. Agríc. Amb.*, v.6, p.207-212, 2002.

TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science*, v.102, p.18-22, 1966.

TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.20, p.333-339, 1996.

VIEIRA, S.R. *et al.* Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. *Tópicos Ciênc. Solo*, v.2, p.1-45, 2002.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *Tópicos Ciênc. Solo*, v.1, p.1-54, 2000.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, v.3, p.1-70, 1985.