

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREA SOB
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

FERNANDO DE SOUZA RODRIGUES

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2014**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREA
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

FERNANDO DE SOUZA RODRIGUES

Gestor Ambiental

Orientador: PROF. DR. JORGE WILSON CORTEZ

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da UFGD, Dourados, MS, Brasil

R696v Rodrigues, Fernando de Souza.
Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em área sob sistema plantio direto / Fernando de Souza Rodrigues – Dourados, MS : UFGD, 2014.
47 f.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Solo – Manejo. 2. Mecanização agrícola. 3. Plantio direto. I. Cortez, Jorge Wilson. Título.

CDD: 631.4

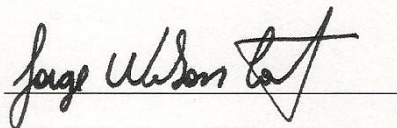
VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM ÁREA SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

por

Fernando de Souza Rodrigues

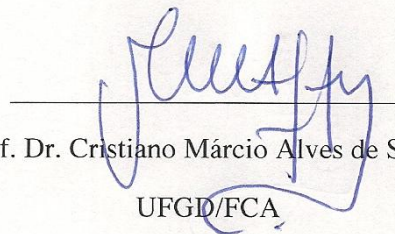
Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovado em 27/02/2014



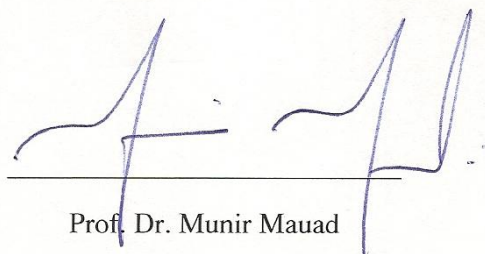
Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez

Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza

UFGD/FCA



Prof. Dr. Munir Mauad

UFGD/FCA

*Aos meus filhos, Maria Fernanda e
João Guilherme, que nos momentos de
minha ausência, dedicados ao estudo,
sempre fizeram entender que o futuro
é feito a partir da constante dedicação
no presente.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela bênção e proteção guiando meus passos em todos os momentos de minha vida.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), pela oportunidade de realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor-orientador Dr. Jorge Wilson Cortez, agradeço muito pelos ensinamentos repassados e pela orientação, apoio e confiança depositados em mim durante o mestrado.

À banca examinadora desse trabalho, composta pelos professores Dra. Anamari Viegas de Araujo Motomiya, Dr. Roberto Carlos Orlando, Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza e Dr. Munir Mauad pelas considerações, discussões e sugestões.

Aos demais professores do PPGEA, pelo conhecimento e pela amizade.

Aos meus pais Vanildo de Souza Rodrigues e Alice Geraldo Rodrigues, por todo o ensinamento, amor, carinho e incentivo que serviram como base para que eu buscasse meus sonhos, objetivos e ideais.

À minha irmã Sandra de Souza Rodrigues pelo apoio e compreensão em todos os momentos de minha vida.

A minha esposa e grande amiga Michele Felizardo Lopes de Oliveira por todo seu amor, carinho, apoio, compreensão e companheirismo, mesmo com a distância e nos momentos mais difíceis.

À equipe de funcionários de campo, do laboratório de solos e da secretaria do PPGEA da UFGD, pelo auxílio, apoio e instrução para a realização dos trabalhos.

Aos demais colegas da Universidade, pela convivência e amizade.

A todos os colegas de pós-graduação, pela companhia e convívio, por compartilhar os conhecimentos, auxiliando na execução, andamento e conclusão deste trabalho, e, principalmente, pela amizade e momentos de descontração.

Aos demais familiares e amigos, que próximos ou distantes, estiverem sempre presentes com seu afago e apoio, me incentivando, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos.

Agradeço também as demais pessoas que, mesmo aqui não citadas, auxiliaram e contribuíram de alguma forma na realização desse trabalho.

A todos vocês, meus sinceros sentimentos de gratidão!

SUMÁRIO

	Páginas
1. INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Sistema plantio direto.....	10
2.2 Compactação do solo	11
2.3 Resistência mecânica do solo à penetração.....	13
2.4 Geoestatística	15
2.5 Agricultura de Precisão	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Local.....	21
3.2 Equipamentos	21
3.3 Parâmetros.....	22
3.3.1 Teor de água no solo	22
3.3.2 Resistência mecânica do solo à penetração	23
3.4 Análise dos dados.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 Resistência mecânica do solo à penetração – análise descritiva	26
4.2 Resistência mecânica do solo à penetração - geoestatística.....	31
5 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

RODRIGUES, F. S. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em área sob sistema plantio direto. 47f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

RESUMO

O uso crescente da mecanização agrícola impõe ao solo compressões que podem afetar os atributos físicos. A resistência mecânica do solo à penetração é um atributo do solo indicador dos efeitos do tráfego e de sistemas de manejo do solo. Assim, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RP) em área de sistema plantio direto. O trabalho foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal da Grande Dourados no município de Dourados, MS. A área de estudo está há 16 anos sob sistema plantio direto. A coleta da RP foi efetuada com uma malha amostral de 20 x 20 metros, por meio de um penetrômetro eletrônico. Os dados foram analisados por camada 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m, além destes foram verificados o valor máximo da RP no perfil e da sua profundidade. Coletou-se amostras de solo para determinação e caracterização do teor de água no solo no momento da coleta da RP. Os pontos foram georreferenciados a fim de se obter os valores de suas coordenadas geográficas, perfazendo uma área de 1 ha. Os dados foram analisados utilizando da estatística descritiva e da geoestatística. Observou-se que os valores de RP mantiveram-se próximos aos limites considerados críticos, evidenciando compactação profunda do solo estudado. O uso da agricultura de precisão permitiu identificar a variabilidade espacial da RP na área e verificar que apenas 37,66% da área apresentava níveis acima de 4,0 MPa que necessita de remoção da camada compactada, e que encontra-se aproximadamente entre 0,41-0,53 m.

Palavras-chave: mecanização agrícola, compactação, agricultura de precisão, mapas de correção.

RODRIGUES, F. S. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em área sob sistema plantio direto. 47f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

ABSTRACT

The increasing use of agricultural mechanization requires the soil pressures that can affect their physical attributes. A mechanical resistance to penetration is an attribute of the sensitive soil to detect the effects of traffic and soil management system. Thus, we aimed to evaluate the spatial variability of soil resistance to penetration (RP) in the area of tillage system. The work was conducted in Experimental Farm of Agricultural Sciences, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD the city of Dourados, MS. The study area is in use 16 years ago this staging system. The collection of RP was performed with a sampling grid of 20 x 20 meter, through the electronic penetrometer. Data were analyzed by layer 0.0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, 0.30-0.40, 0.40-0.50 and 0.50 - 0.60 m, beyond these were checked the value of maximum occurrence of RP in profile and depth of occurrence of the maximum value of the RP. Was a collected soil sample for determination and characterization of the water content in the soil at the time of collection of RP. The points were georeferenced in order to obtain the coordinate values. Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics. It was found that the values of RP remained close to the limits considered critical, showing deep soil compaction study. The use of precision agriculture identified the variability in the RP in the area and finds that only 37.66 % of the area had levels above 4.0 MPa requiring removal of the compressed layer and lying between approximately 0, 41 to 0.53 m.

Key words: agricultural mechanization, soil compression, precision agriculture, application maps.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade física dos solos é um importante elemento para a sustentabilidade nos sistemas agrícolas, devido às propriedades físicas e os processos pedogenéticos do solo estarem envolvidos no suporte ao crescimento radicular, armazenagem e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica. A Sociedade Americana de Ciência do Solo conceitua a qualidade do solo como a capacidade de um dado solo funcionar, dentro de um sistema natural ou manejado de forma a manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e suportar a saúde humana e habitacional (ARAÚJO et al., 2012).

O preparo do solo é importante em qualquer sistema de exploração agrícola, porém, apresenta elevado custo operacional e afeta o desenvolvimento e a produção das culturas. Segundo Siqueira et al., (1995) seu objetivo é alterar o solo para melhorar as condições de germinação das sementes, sua emergência e estabelecimento das plântulas. Por atuar diretamente sobre a estrutura do solo provoca modificações nas suas propriedades físicas, diferenciando-as, cada vez mais, da situação original, resultando no aumento da compactação do solo, promovida principalmente pelo tráfego em sistemas de preparo mínimo e pelo preparo inicial em sistemas convencionais (MERNES et al., 2003).

O sistema plantio direto (SPD) é uma técnica apropriada para garantir a conservação do solo e da água devido às condições climáticas da região. Esse sistema foi desenvolvido para reduzir a ação da erosão, o uso de máquinas, o tempo entre a colheita da safra anterior e a semeadura da safra seguinte, elevar a umidade do solo, conseqüentemente reduzindo custos de produção (INOUE, 2003).

O SPD tem apresentado importantes melhorias nas características químicas e biológicas do solo, assim como contribui com a redução da erosão. Entretanto pode-se verificar que para as características físicas ocorre o inverso, principalmente na camada superficial, devido à ausência da mobilização do material, onde tem ocorrido aumento da densidade, da resistência à penetração do solo e redução da macroporosidade, com maior incidência em solos de textura mais argilosa. Nestes solos ocorre maior retenção de água devido ao grande volume de microporos quando comparados a solos de textura arenosa, além da forma e disposição das partículas

laminares, o que tem favorecido o processo de compactação dos mesmos (SECCO, 2004).

Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nos atributos do solo, como consequência tem aumentado o interesse da comunidade científica em avaliar a qualidade dos solos submetidos a diferentes processos de cultivo a fim de definir a tecnologia mais racional de uso do solo. A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo na qualidade dos solos são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (NIERO, 2009).

Os indicadores físicos de qualidade do solo são parâmetros utilizados para avaliar as possíveis mudanças ambientais no sistema solo-planta. Um desses indicadores é a resistência do solo à penetração, que se caracteriza como uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionada ao crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo. Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro e na direção preferencial do crescimento radicular (ECCO et al., 2012). Outro fator contribuinte aos danos estruturais dá-se na condição do teor de água do solo no período de implantação das culturas, quando normalmente o solo apresenta-se com umidade acima do ponto de friabilidade; assim ao ocorrer tráfego de veículos mecanizados, potencializa-se o efeito da compactação do solo (ROSA, 2011).

Devido à preocupação com a perda de qualidade do solo grande parte das áreas agrícolas manejadas sob sistema plantio direto são afetadas por problemas de compactação. Nesse sentido, na região de clima subtropical úmido do Brasil, tem-se observado áreas com tendência à intensa degradação estrutural da camada subsuperficial do solo, perceptível por alterações das propriedades físicas do solo, alterações morfológicas das raízes de plantas e percepção de redução de produtividade das culturas. Também se tem observado com frequência, erosão em sulcos e entressulcos, decorrente da baixa taxa de infiltração de água no solo (DRESCHER et al., 2012).

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RP) em área sob sistema plantio direto em Latossolo Vermelho Distroférico, na região e Dourados-MS.

2 REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema plantio direto

As terras agrícolas vêm sofrendo um processo acelerado de degradação da sua capacidade produtiva seja pelo uso inadequado ou problemas relacionados ao manejo do solo. A definição de estratégias para o manejo é a primeira etapa no planejamento das práticas agrícolas, contribui para o sucesso na implantação e no desempenho das culturas. O manejo adequado, além de proporcionar estabilidade de produção, diminuir os gastos com insumos e com as demais perdas causadas pela erosão, melhora a renda dos agricultores, fixa o homem no campo e melhora a qualidade de vida das comunidades devido à preservação do ambiente (TORRES e Saraiva, 1999).

Desta forma Coan (1994), citado por Inoue (2003) adverte que para muitas regiões é necessário substituir os sistemas convencionais de preparo de solo que utilizam excessiva manipulação mecânica, por outros sistemas que promovam o mínimo de mobilização e que deixem o máximo possível de resíduos na superfície, garantindo melhor movimentação e retenção de água no solo, preservando a estrutura do solo, a porosidade, além de realizar a distribuição de matéria orgânica.

O SPD é um sistema conservacionista que visa a não utilização ou a utilização mínima de insumos como corretivos da acidez do solo, fertilizantes químicos, inseticidas, fungicidas, além de diminuição da mecanização agrícola em todas as fases dos sistemas de produção, propiciando aumento da produtividade devido ao efeito benéfico causado no solo pela matéria orgânica resultante da decomposição da palhada (LOPES, 2008). O sistema é adaptável a várias regiões brasileiras e, dependendo das condições do local, é possível a utilização de diferentes espécies vegetais, como por exemplo, as gramíneas, para a formação da palhada, possibilitando também a redução do desmatamento e a recuperação de áreas degradadas.

De acordo com Costa e Matos (1997), a remoção total da cobertura vegetal para a instalação de culturas cultivadas em sistema de manejo convencional, representa uma das atividades mais emissoras de carbono no mundo, sendo que 22% do total de emissões mundiais são provenientes da agricultura e do desmatamento.

Nos últimos anos, tem sido ressaltada a contribuição do SPD na diminuição da emissão de CO₂ para a atmosfera, determinando uma redução de 2,50 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹, comparativamente ao preparo convencional (BAYER et al., 2000). A utilização do sistema plantio direto, além do papel de sequestro de carbono, também pode promover o aumento da produtividade agrícola, melhorar a fertilidade do solo e a qualidade da água.

As principais vantagens no sistema plantio direto são descritas por Cruz et al. (2001) como sendo: racionalização no uso de insumos e máquinas; proteção, melhoramento químico e reestruturação física do solo com a palhada, a rotação de culturas, a reciclagem de nutrientes, a preservação da matéria orgânica e o desenvolvimento de macro e micro-organismos responsáveis pela vida dos solos; redução substancial de consumo de combustível por tonelada de grãos; redução do eliminação da poluição e eutrofização de cursos d'água pelos sólidos e solutos no escoamento de chuva em excesso; redução da pressão de abertura de novas áreas; agricultura produtiva, próspera e sustentável o que resulta em custos menores dos alimentos e menor migração da população rural para cidades grandes, principalmente quando se utiliza tal sistema em agricultura familiar. As desvantagens são descritas pelo mesmo autor como sendo: sistema não aplicável a todas as condições de solo e não adaptável a alguns tipos deles; dificulta a incorporação de adubos; maior uso de herbicidas elevando custos; resultados piores em solos mal corrigidos e erodidos; deficiência na eliminação de focos de doenças e pragas presentes em restos culturais; necessidade de melhor conhecimento e, geralmente, maior custo no controle de plantas daninhas; necessidade de estabelecimento da cobertura morta; exigência de maior assistência técnica especializada.

2.2 Compactação do solo

Os solos são constituídos de quatro grandes componentes: substâncias minerais, matéria orgânica, água e ar. Solos considerados com ótimas condições para desenvolvimento vegetal devem conter metade de seu volume ocupado por sólidos, minerais e matéria orgânica, já a outra metade deve conter espaços porosos preenchidos equitativamente com água e ar (BRANDY, 1989; FERREIRA, 1992). Esses quatro componentes não se encontram isolados uns dos outros. A matéria

orgânica está misturada com a parte mineral, formando uma estrutura porosa. A parte líquida contida nos poros constitui a solução do solo, disponibilizando os minerais em forma de íons para as raízes das plantas, e o ar dos poros é indispensável para as trocas gasosas das raízes.

O manejo inadequado do solo pode modificar essa relação entre seus constituintes, podendo resultar na diminuição da porosidade, reduzindo a capacidade de infiltração e retenção de água e, conseqüentemente, redução da produtividade das culturas que encontram maior resistência à penetração de suas raízes. Um dos indicadores de qualidade do solo é a compactação, que pode ser definida como aumento da densidade do solo provocada pelo rearranjo das partículas primárias e dos agregados, causada, principalmente, pelas operações de cultivo ou pela pressão de veículos e implementos de preparo do solo (TORRES et al., 1993).

Dias Jr. e Pierce (1996) explicam que o termo compactação do solo refere-se à compressão artificial do solo não saturado, durante a qual ocorre aumento da densidade, em consequência da redução de volume pela expulsão do ar. O processo de compactação do solo pode ocorrer devido à diminuição do espaço poroso entre os agregados, ocorrendo reestruturação destes na matriz do solo e, também devido à destruição dos agregados, com conseqüente reorganização das partículas de argila, silte e areia, resultando em uma estrutura maciça e coesa na matriz do solo. Para Hamza e Andersen (2005), a compactação do solo pode ser definida como um processo dinâmico e gradual, em que ocorre aumento da densidade, maior massa de solo por unidade de volume, proporcional ao histórico de cargas ou pressões exercidas.

Esses processos dependem da umidade do solo e das pressões externas a ele aplicadas durante o manejo. Segundo Pacheco e Cantalice (2011), a compressão do solo depende de fatores internos e externos. Dentre os fatores internos está a composição mineralógica, textura, estrutura, umidade do solo e matéria orgânica; os fatores externos podem ser atribuídos principalmente à energia de compactação aplicada ao solo, que pode ser natural, pela ação do impacto das gotas de chuva, ou artificial por meio do pisoteio de animais ou de humanos e pelo uso de equipamentos agrícolas.

Para Tormena e Roloff (1996), os aspectos inerentes à variabilidade temporal, espacial da resistência à penetração estão relacionados com os processos

de adensamento do solo após o preparo, compactação pelo tráfego de máquinas, e principalmente pelas variações do conteúdo de água do solo com o tempo, o qual acompanha a dinâmica do clima em áreas não irrigadas. Os solos que possuem um determinado nível de desenvolvimento estrutural apresentam um grau elevado de variabilidade espacial e temporal das suas propriedades físicas, inclusive aquelas importantes para o desenvolvimento radicular.

Em áreas manejadas sob sistema plantio direto, tem sido observada a formação de uma camada de solo mais compactada a 0,08-0,20 m de profundidade (Genro Junior et al., 2009). Em algumas situações, o grau de compactação dessa camada atinge valores limitantes a produtividade das culturas (Franchini et al., 2009).

Para Hakasson; Voorhes (1996) e Salire et al. (1994), no SPD, a ausência de revolvimento do solo e a manutenção de teores de umidade mais elevados em virtude da manutenção dos resíduos culturais, aliada ao tráfego sistemático de máquinas, podem promover compactação excessiva na superfície do solo, principalmente em solos com elevados teores de argila. A compactação por pneumáticos pode ser superficial, induzida pela insuflagem de ar nos pneus e subsuperficial, provocada pela massa por eixo. Sistemas de preparo de solo em menor escala aliadas ao tipo de solo, podem induzir diferentes magnitudes de variabilidade na resistência à penetração.

2.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é fundamental para avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo. Por meio do uso das medidas da RP pode-se verificar o seu estado de compactação, e esta avaliação pode ser feita por meio de penetrometria. A RP possui inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, tais como: detecção de camadas compactadas, em estudo da ação de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA et al., 2002).

Para Groenevelt et al. (1984), a ocorrência da RP é devida a dois fatores: a compressão das partículas primárias e a fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento relativo da raiz.

A resistência que o solo oferece ao desenvolvimento das raízes difere da resistência medida pelos penetrômetros.

Segundo Taylor (1974), a raiz cresce por meio dos poros e pontos de menor resistência, enquanto os penetrômetros avaliam a resistência média que o solo oferece à introdução do equipamento. No entanto, esse valor apresenta boa correlação com o desenvolvimento de raízes, validando a sua utilização no preparo de substratos para testes de plantas com capacidade de vencer altas resistências.

Sá e Santos Júnior (2005) afirmam que a RP que o solo oferece aos penetrômetros apresenta correlação com a resistência oferecida ao sistema radicular, sendo que os penetrômetros apenas simulam a resistência ao crescimento radicular. Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam de 1,5 a 4,0 MPa, conforme o tipo de solo e a espécie vegetal sendo, em geral, o valor de 2,0 MPa aceito como impedimento ao crescimento radicular (TORMENA al., 1998). De maneira geral, é aceito o valor de 2,0 MPa como sendo o valor limite ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas, então o solo passa a ser considerado como sendo compactado. Entretanto, Tavares Filho et al. (2001) mostraram que tais valores de resistência, quando superiores a 3,5 MPa, não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, influenciando apenas sua morfologia, porém em função da resistência à penetração estar diretamente relacionada à umidade do solo, apresentando relação inversa, têm sido bastante difícil estabelecer a nível de campo os valores críticos de resistência em função do processo de umedecimento e secagem devido a chuvas, que alteram rapidamente de uma possível condição limitante para não limitante, em termos de resistência do solo à penetração. Já para o conceito de intervalo hídrico ótimo, Silva et al. (1994) relacionaram o valor de 2,0 MPa como limite crítico para o ótimo desenvolvimento radicular.

A avaliação da RP e a determinação da curva de resistência são importantes no estudo do efeito da compactação sobre as suas condições físicas do solo, podendo ser utilizada para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo. Assim, a avaliação e o monitoramento das camadas de impedimento mecânico

do solo ao desenvolvimento radicular tornam-se ferramentas importantes para caracterizar a evolução de sistemas agrícolas e, também, para servir como subsídio indispensável a ser usado no planejamento e direcionamento das práticas de cultivo empregadas dentro de uma propriedade agrícola (SANTOS, 2005).

De maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 10%, na qual a difusão de oxigênio no solo torna-se limitante ao funcionamento das raízes. Valores de resistência do solo à penetração das raízes de 2,0 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. No entanto, este valor é muito sensível à condição estrutural do solo, especialmente em solos de plantio direto em que a presença de macroporos oriundos da atividade biológica pode atuar como rotas alternativas para o crescimento das raízes em profundidade. (TORMENA et al., 1998).

Baseado na discussão dos valores de referências da RP como níveis críticos ao desenvolvimento radicular, Ribeiro (2009) ao compilar trabalhos sobre RP em Latossolo Vermelho eutroférico típico estabeleceu a classificação para RP: baixo (0 a 2 MPa); médio (2 a 4 MPa); alto (4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa).

2.4 Geoestatística

A aplicação das ferramentas da estatística clássica de Fischer na experimentação agrícola, para que se possam empregar testes de comparação entre tratamentos, está vinculada à observação dos pressupostos básicos da análise de variância, tais como: independência entre observações; independência e homogeneidade entre os erros e as observações; aditividade dos efeitos; normalidade dos resíduos. No entanto, vários trabalhos têm demonstrado que observações vizinhas, de variáveis do solo apresentam correlação ou dependência espacial (VIEIRA et al., 1983; PREVEDELLO, 1987; SCOTT et al., 1994; CAMBARDELLA et al., 1994; CAHN et al., 1994; PAZ et al., 1996; SOUZA, 1999). Outros trabalhos têm evidenciado que observações vizinhas de atributos da planta também não são aleatórias, ou seja, não variam ao acaso, e seguem comportamento espacial (TABOR et al., 1984; VIEIRA et al., 1987; MULLA, 1993; SALVIANO et al., 1995).

Consequentemente, os valores em locais mais próximos entre si são mais semelhantes, até um determinado limite, que aqueles tomados a maiores distâncias. Caso isto ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes, e um tratamento estatístico mais adequado será necessário (EGUCHI, 2001). Blackwell (1975) afirma que duas variáveis são independentes se a distribuição de cada uma, dados os valores da outra, é sempre igual à sua distribuição incondicional, isto é, não depende dos valores das outras variáveis. Se duas variáveis são independentes, certamente, não são correlacionadas.

O problema está em que é impossível saber, antes de amostrar, de que maneira as amostras vão se comportar (dependente ou independente uma da outra). Devido a essas limitações da estatística clássica e pelo fato dos solos serem heterogêneos, pois a maioria de seus atributos varia no espaço e no tempo, torna-se necessária a utilização de procedimentos estatísticos adicionais, que considerem e reflitam essas variações (SILVA, 1988).

Sendo assim, a variabilidade espacial das variáveis pode ser estudada por meio das ferramentas da geoestatística, que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma variável estão, de alguma maneira, relacionados à sua disposição espacial e, portanto, as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores (VIEIRA et al., 1981; VAUCLIN et al., 1983). Uma premissa básica é que em todas as áreas existem regiões mais ricas do que outras, para uma determinada variável. Logo, amostras tomadas numa região mais rica seriam, em média, mais ricas do que aquelas tomadas numa região mais pobre, ou seja, o valor da variável regionalizada depende de sua localização (SOUZA, 1992; MATA, 1997),

Na teoria das variáveis regionalizadas, $Z(x)$ pode ser definida como uma variável aleatória que assume diferentes valores Z em função da posição x dentro de uma determinada região S , uni, bi ou tridimensional, com certa aparência de continuidade (SOUZA, 1999). O conjunto de variáveis $Z(x)$ medidas em toda a área pode ser considerado uma função aleatória $Z(x)$, uma vez que são variáveis aleatórias, regionalizadas e considera-se que a dependência entre elas é regida por algum mecanismo probabilístico (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

A obtenção de informações a respeito da variabilidade espacial das propriedades do solo e das plantas é de grande importância para a avaliação da

fertilidade; levantamento, mapeamento e classificação de solos; desenvolvimento de esquemas mais adequados de amostragens, entre outros, visando à melhoria das condições de manejo e o incremento de produtividade das culturas (SOUZA, 1992).

Para aplicação da geoestatística, um conjunto de amostras homogeneamente distribuído na região-alvo seria o ideal, mas isto poderia vir acompanhado por um viés provocado pela presença de algum padrão embutido no próprio perfil da região (LAMPARELLI et al., 2001). Por essa razão, uma aleatorização específica sempre é preferida. Apesar de a aleatorização vir acompanhada por uma determinada dificuldade de localização das amostras, e talvez uma incompleta cobertura da área estudada quando o número de amostras não é suficientemente grande, estimadores de estatísticas como média e variância não são viciados nesse caso. Uma mistura dos dois esquemas, regular e aleatório, seria o ideal para que se mantivessem os principais benefícios de cada esquema em separado. A amostragem aleatória estratificada possui parte das vantagens do esquema aleatório e do regular. Os pontos são alocados aleatoriamente dentro de uma célula da grade. Com isso cobre-se parte do problema do viés nas estimativas, ainda mantendo uma distribuição homogênea na área (GUIMARÃES, 2001).

A análise exploratória dos dados é um estágio inicial para verificar e descrever as medidas estatísticas e matemáticas dos dados o que, melhora a eficiência da análise estatística (ALVES, 1987; FARIAS, 1999) e para auxiliar na decisão das hipóteses de estacionaridade que podem ser assumidas (HAMLETT et al., 1986; FOLEGATTI, 1996).

A estimativa da dependência entre amostras vizinhas no espaço pode ser realizada por meio da autocorrelação que é de grande utilidade quando se está fazendo amostragem em uma direção. Quando a amostragem envolve duas direções (x,y) o instrumento mais indicado na estimativa da dependência entre amostras é o semivariograma (SILVA, 1988). O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, por meio da técnica de krigagem (SALVIANO, 1996).

Na maioria das vezes o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados. O interesse pode ser em um ou mais pontos

específicos da área ou obter uma malha de pontos interpolados que permitam visualizar o comportamento da variável na região por meio de um mapa de isolinhas ou de superfície. Para se obter maior detalhamento da área em estudo é necessária à aplicação de um método de interpolação, como a krigagem (SILVA JUNIOR, 2001). Segundo Gonçalves (1997) e Silva Junior (2001) a krigagem pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância. Existem diversos tipos de krigagem: simples, ordinária, universal, indicadora, probabilística etc.

No ajuste de semivariogramas experimentais, sempre existe um certo grau de incerteza sobre as hipóteses de estacionaridade assumidas, modelos selecionados, parâmetros ajustados e qualidade da krigagem. Esta incerteza representa o erro da estimativa que pode ser avaliado pelo procedimento denominado de validação cruzada ("*cross validation*") (VIEIRA et al., 1981; ISAACS e SRIVASTAVA, 1989; CRESSIE, 1991) ou "*jack-knifing*" (VIEIRA, 1998). Nessa técnica, cada ponto medido é excluído e seu valor estimado com os dados restantes (VIEIRA, 1997 e 1998), ou seja, ela estima os valores da variável em estudo sobre os mesmos pontos amostrados e compara os novos valores com os dados medidos.

A técnica "*jack-knifing*" permite avaliar a qualidade do método de estimativa de dados e, também, definir o melhor número de vizinhos mais próximos a um determinado ponto para a estimativa do valor neste ponto. A técnica é também utilizada para avaliar se o modelo do semivariograma experimental usado no processo de estimativa de dados é o que melhor se ajusta aos dados (SOUZA, 1992).

2.5 Agricultura de Precisão

Desde os meados da década de 1980, um grande número de termos tem sido usado para descrever o conceito da agricultura de precisão: agricultura por metro quadrado (REICHENBERG E RUSSNIGLE, 1989); agricultura com base em tipos de solos (CARR et al., 1991; LARSON E ROBEERT, 1991); aplicação de insumos a taxas variáveis – VRT (SAWYER, 1994); variável espacial, precisão, prescrição, ou manejo específico de culturas (SCHUELLER, 1991); manejo por zonas uniformes (PIERCE E SADLER, 1997).

Assim, o manejo de solos e culturas por zonas uniformes tem por definição a propriedade de identificar e analisar características de solo, histórico de cultivo, clima e outras variáveis do sistema de produção, em diferentes locais dentro do campo. Agricultura de precisão ou manejo por zonas uniformes tem por princípio básico o manejo da variabilidade dos solos e culturas no espaço e no tempo. Sem essa variabilidade, o conceito de agricultura de precisão tem pouco significado e nunca teria evoluído (MULLA & SCHEPERS, 1997). A agricultura de precisão engloba aspectos da variabilidade dos solos, clima, diversidade de culturas, desempenho de máquinas agrícolas e insumos naturais ou sintéticos, usados na produção das culturas. Com base nesses princípios, Pierce & Nowak (1999) utilizam a seguinte definição: “Agricultura de Precisão é a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental”.

A Agricultura de Precisão é uma técnica de gerenciamento sistêmico e otimizado do sistema de produção, através do domínio da informação, com a utilização de uma série de tecnologias e tendo como peça chave o posicionamento geográfico (TORRE NETO, 2002). A essência da agricultura de precisão é a contínua obtenção de informações espacialmente detalhadas da cultura seguida da utilização adequada dessas informações para otimizar o manejo. Ou seja, com a agricultura de precisão define-se como aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários na produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas.

O grande desafio da agricultura de precisão está em considerar as variações espaciais e temporais dos diversos parâmetros envolvidos no processo de produção agrícola. No solo, o teor de nutrientes, o teor de matéria orgânica, o pH, a umidade, a profundidade de camadas compactadas, entre outros parâmetros, apresentam variações que podem variar muito de um local para outro ou de uma data para outra, na mesma área de produção. Toda a prática agrícola convencional está baseada em tratar o campo como homogêneo, ignorando tais variações. No manejo convencional, a informação para melhoria do processo de produção é obtida de umas poucas amostras dos parâmetros. A interpretação da informação assume um valor médio das amostragens. O uso da informação, ou seja, a aplicação de insumos é uma constante

baseada nessa média e independe da maior ou menor necessidade de cada ponto da aplicação.

Os principais componentes do sistema da agricultura de precisão devem associar as medidas e compreensão da variabilidade. Posteriormente, o sistema deve usar a informação para manejar a variabilidade, associando a aplicação de insumos usando o conceito de manejo localizado e as máquinas e equipamentos para a correta aplicação dos diferentes insumos a serem manejados. Finalmente, e mais importante, esse sistema deve recordar a eficiência das práticas, com a finalidade de avaliar o seu valor para o agricultor (COELHO, 2005).

A agricultura de precisão tende a se tornar cada vez mais comum nas propriedades rurais. As tecnologias hoje existentes já permitem que se tenha um grande conhecimento das variabilidades encontradas entre as diferentes áreas da propriedade, o que já proporciona a tomada de decisão com base em dados precisos.

O uso da agricultura de precisão em propriedades onde se tem como objetivo, maximizar os lucros e minimizar os danos ambientais é imprescindível. Desta forma se tem maior controle sobre as possíveis causas na redução da produtividade e/ou dano ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local

O trabalho foi conduzido na FAECA – Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD no município de Dourados, MS. O local situa-se em latitude de 22°14’S, longitude de 54°59’W e altitude de 434 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. O solo da área é um Latossolo Vermelho distroférico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Na Tabela 1 é apresentada a análise granulométrica do solo. A área experimental foi cultivada por 16 anos sob sistema plantio direto.

Tabela 1. Granulometria e densidade de partículas do Latossolo Vermelho da área experimental

Camadas (m)	Argila	Silte	Areia	DP*
	-----%-----			g cm ⁻³
0,00-0,10	59,78	21,73	18,49	2,75
0,10-0,20	59,26	22,24	18,50	2,69
0,20-0,30	62,31	19,79	17,91	2,84
0,30-0,40	62,83	20,23	16,94	2,75
0,40-0,50	64,31	18,90	16,79	2,69
0,50-0,60	64,86	19,72	15,42	2,79

*DP: densidade de partículas.

3.2 Equipamentos

Utilizou-se um penetrômetro eletrônico denominado de PenetroLOG® PLG1020 - Medidor Eletrônico de Compactação do Solo (FALKER, 2010) da empresa Falker Automação Agrícola para coleta de dados da resistência mecânica do solo à penetração. O medidor segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3, a qual especifica as regras e procedimentos para a medição de compactação do solo (FALKER, 2010). O PenetroLOG é composto de um módulo eletrônico acoplado a uma haste dividida em duas partes, com um cone na ponta inferior, haste tipo 2. O PenetroLOG possui entrada serial RS-232 que permite descarregar os dados

ao computador e conectar um GPS – Sistema de Posicionamento Global para determinação da posição geográfica, visando o uso para agricultura de precisão.

Para a determinação da posição geográfica dos pontos na área foi utilizado um GPS de navegação da marca Garmin® configurado para trabalhar com modelo WGS84, no sistema UTM – Universal Transverso de Mercator.

Foi utilizada uma trena de 50 metros para determinação dos pontos de amostragens na malha. Uma trena de 5 metros para determinação da profundidade de coleta das amostras de solo visando determinar o teor de água do solo.

No laboratório, foi utilizada uma balança de precisão de 0,01 gramas para pesagem e estufa digital para secagem das amostras de solo a 105°C.

3.3 Parâmetros

3.3.1 Teor de água no solo

Para a determinação do teor de água no solo coletou-se amostras nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m de modo aleatório. O teor de água no solo foi determinado pelo método gravimétrico, de acordo com metodologia proposta por Kiehl (1979) e Embrapa (1997), em amostras deformadas de solo seco em estufa. O cálculo do teor médio de água é efetuado conforme Equação 1.

$$TMA = \frac{(MI - MII)}{(MII - TA)} \times 100 \quad (1)$$

Em que: TMA: teor médio de água contido no solo em %; MI: massa úmida de solo mais o peso da lata (g); MII: massa seca de terra mais o peso da lata (g); e TA: peso da lata em (g).

Na Tabela 2 é apresentado o teor de água no solo no momento da coleta de dados. Observa-se que há proximidade dos valores ao longo do perfil.

Tabela 2. Teor de água no solo no momento da coleta da resistência mecânica do solo à penetração

Camada (m)	Teor de água no solo (%)
0,00-0,10	26,39
0,10-0,20	27,04
0,20-0,30	27,94
0,30-0,40	29,35
0,40-0,50	29,07
0,50-0,60	32,21

3.3.2 Resistência mecânica do solo à penetração

A metodologia para espacialização da resistência mecânica do solo à penetração constou da montagem de malha regular de coleta de 20m x 20 m (Figura 1) com 40 pontos (área de aproximadamente 1,0 ha). Os dados foram coletados pelo penetrômetro eletrônico nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m. Após a coleta de dados os mesmos foram descarregados em software específico e transportados para planilha eletrônica, para posterior realização das análises por camadas. Além dos dados por camadas foi obtido pela análise do perfil do solo de cada ponto os valores máximos de RP, e a profundidade de ocorrência do valor máximo da RP. Desse modo, foram confeccionados oito mapas de variabilidade espacial da área.

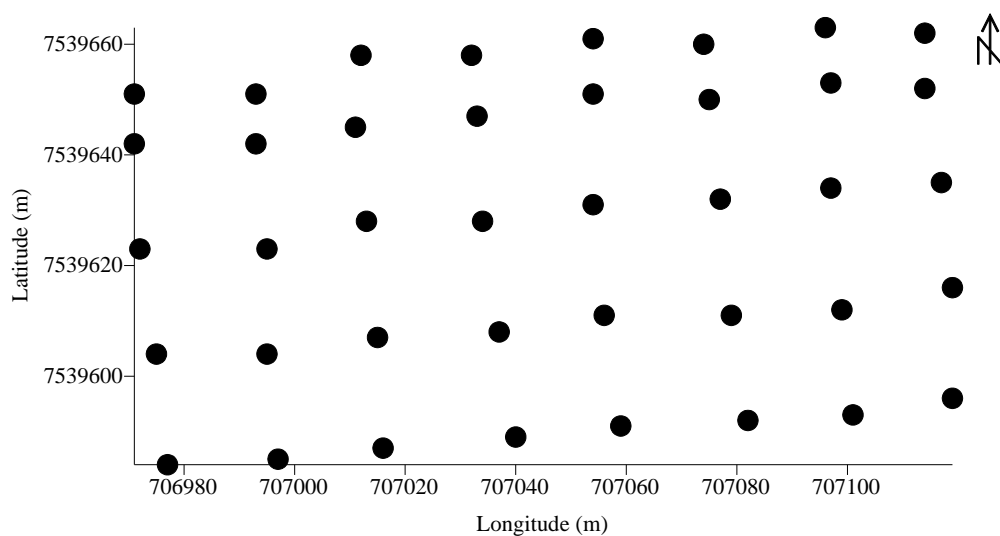


Figura 1. Malha de pontos amostrais da área

3.4 Análise dos dados

Inicialmente, os dados foram analisados por meio da estatística descritiva, segundo Vieira et al. (2002), obtendo-se média, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose, para obter uma visão geral do comportamento dos dados. Foi efetuada a distribuição de frequência para caracterizar a normalidade dos dados utilizando o teste Ryan-Joiner similar ao Shapiro-Wilk a 5%. Nesse teste a estatística verifica a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população de distribuição normal. Dados atípicos podem ser identificados nas análises descritivas por meio dos gráficos Box-plot.

Para verificação da dependência espacial, interpolação dos dados de resistência à penetração e construção de mapas foi empregada à análise geoestatística. Foi construído o semivariograma, partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do cálculo da função semivariância. Foi calculado o semivariograma para analisar a dependência espacial. O ajuste do semivariograma foi observado pelo maior valor do coeficiente de determinação (r^2), menor valor da soma de quadrados dos desvios (RSS) e maior valor do avaliador de dependência espacial (ADE).

O ajuste do semivariograma foi realizado “a sentimento”, escolhendo-se um modelo e seus parâmetros, sobrepondo-o aos pontos estimados e verificando-se visualmente sua adequação e colocando a prova na validação cruzada, observando o valor do coeficiente angular. O semivariograma fornece estimativas dos parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance. O efeito pepita (C_0) é o parâmetro do semivariograma que indica a variabilidade não explicada dos modelos, considerando a distância de amostragem utilizada. O semivariograma apresenta efeito pepita puro quando a semivariância for igual para todos os valores de h . O patamar ($C_0 + C$) é o valor da semivariância em que a curva se estabiliza sobre um valor constante, sendo representado pelo ponto em que toda a semivariância da amostra é de influência aleatória. À medida que h aumenta a semivariância também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza. O alcance da dependência espacial representa a distância na qual os pontos amostrais estão correlacionados entre si. A análise da dependência espacial (ADE) foi realizada segundo Landim (1998) em fraco <25%, moderado entre 25 e 75%, e forte >75%, respectivamente.

Em seguida à modelagem dos semivariogramas, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária, sendo esta uma técnica de interpolação para estimativa de valores de uma propriedade em locais não amostrados. A krigagem, no entanto, faz uso de um interpolador linear não tendencioso e de variância mínima, que assegura a melhor estimativa dos dados não amostrados. Por meio de interpolação por krigagem, os mapas de isolinhas (bidimensionais) foram construídos para o detalhamento espacial dos dados coletados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência mecânica do solo à penetração – análise descritiva

Os valores médios da resistência mecânica do solo à penetração (RP) podem ser classificados como proposto por Ribeiro (2009) ao compilar trabalhos sobre RP em Latossolo Vermelho eutroférico típico e estabeleceu a classificação: baixo (0 a 2 MPa); médio (2 a 4 MPa); alto (4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa). Para a camada de 0,00-0,10 m, os valores médios de RP foram considerados como baixos; para as demais camadas a RP foi considerada como média (Tabela 3). O uso dos valores médios das camadas para determinação da RP, e para confecção dos mapas de manejo (escarificação/subsolagem) deve ser usado com critério, pois pode mascarar os problemas de compactação do solo. Assim, equipamentos de avaliação da RP que apresentam como resultado a média deve ser utilizado com cuidado, pois pode esconder o real valor da RP. Uma possibilidade é o uso da RP máxima do perfil (Tabela 3), ou valores máximos de RP de cada camada.

Tabela 3. Estatística descritiva para resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas camadas avaliadas.

Parâmetros	Camadas avaliadas (m)							Prof. RPMax (m)
	0,00 a 0,10	0,10 a 0,20	0,20 a 0,30	0,30 a 0,40	0,40 a 0,50	0,50 a 0,60	RPMMax (MPa)	
Média (MPa)	1,16	2,18	2,60	2,60	2,74	2,87	3,81	0,38
Erro padrão	0,08	0,07	0,12	0,14	0,19	0,23	0,20	0,02
DP	0,50	0,44	0,74	0,89	1,21	1,45	1,26	0,16
Variância	0,25	0,19	0,55	0,79	1,47	2,10	1,58	0,026
Mínimo	0,04	1,38	1,52	1,37	0,93	0,91	2,00	0,06
Máximo	2,15	3,43	4,56	4,90	5,35	5,54	6,52	0,58
CV (%)	42,72	20,21	28,56	34,06	44,17	50,42	32,98	42,65
As	-0,02	0,67	1,07	1,01	0,50	0,30	0,45	-0,34
Curtose (k)	-0,33	0,81	0,44	0,33	-0,79	-1,33	-0,85	-1,29
RJ	0,99	0,98	0,95	0,95	0,97	0,96	0,98	0,96
Probabilidade	>0,10*	>0,10*	<0,01 ^{NS}	<0,01 ^{NS}	0,09*	0,02 ^{NS}	>0,10*	0,03 ^{NS}

*: distribuição normal pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). ^{NS}: distribuição não significativa pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). CV.: coeficiente de variação. DP: desvio padrão. As: Assimetria. RJ: Ryan-Joiner

Os valores máximos de RP (RPMMax) obtidos em cada camada apresentam resultados diferentes dos médios da RP (Tabela 3), sendo que a camada de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram consideradas com RP média, e as camadas de

0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m foram consideradas com RP alta (Ribeiro, 2009). Este fato demonstra que em algum ponto do perfil analisado os valores de RP passam a ser considerados como médio e alto o que não se observou utilizando os valores médios da RP. Portanto, os mapas de manejo do solo devem ser baseados em valores máximos de RP, e não média, pois o uso da média mascara o real valor da RP. Os valores observados para a profundidade da RPM_{Max} foi de 0,38 m (Tabela 3), o que caracteriza a necessidade do uso de uma subsolagem para remoção, e pode-se caracterizar como uma compactação profunda.

Na agricultura convencional os valores médios de RP observados (Tabela 3), indicam uma RP média na maior parte da área, o que poderia deixar de realizar a operação de subsolagem. Mas caso o produtor deseja-se fazer a subsolagem iria fazer entre 0,43-0,48 m, considerando que a profundidade de trabalho dos equipamentos de hastes deve ser de 0,05-0,10 m abaixo da camada compactada.

Warrick e Nielsen (1980), classificou o coeficiente de variação (CV), em alto ($CV > 62\%$), médio ($12\% < CV < 62\%$) e baixo ($<12\%$). Todas as camadas apresentaram CV médio (Tabela 3). A RP apresenta ao longo da área grandes variações e é comum a ocorrência de CV acima do observado para outras variáveis.

A assimetria da distribuição dos dados de RP foi realizada pelo coeficiente de Pearson (A_s), sendo classificada como distribuição assimétrica ($|Assimetria| < 0,15$), moderada ($0,15 < |A_s| < 1,0$), e forte ($|A_s| > 1,0$), segundo Coelho et al. (2012), mostrando que os valores de RP nas camadas, a RP máxima e a profundidade da RP máxima apresentaram distribuição assimétrica ($|Assimetria| > 0,15$) a exceção à camada 0,00-0,10 m (Tabela 3). A distribuição de frequência se afasta da simetria, quando $A_s > 0$ tem-se uma distribuição assimétrica à direita; se $A_s < 0$ a distribuição é assimétrica à esquerda; e se $A_s = 0$ a distribuição é simétrica (GUIMARÃES, 2001).

O coeficiente de curtose (k) é classificado como distribuição platicúrtica ou achatado ($k > 2,63$) e como leptocúrtica ou alongada ($k < 2,63$), segundo Coelho et al. (2012). Nesse caso, todas as distribuições apresentaram coeficiente de curtose $k < 2,63$, o que as classifica como leptocúrtica ou alongada, ou seja, os dados apresentam menor variação e frequência modal mais acentuada (Tabela 3). Quando mais próximo de zero, mais próximo da normalidade e da curva normal, não sendo

necessário para aplicação da geoestatística, mas facilita o ajuste do semivariograma (CORTEZ et al., 2011)

No teste de Normalidade de Ryan-Joiner, quanto maior a correlação, maior será a probabilidade de não rejeitar a normalidade (SOARES, 2006). A partir do referido teste, pode-se aceitar ou rejeitar a hipótese nula de normalidade, sendo que quando $p > 0,05$, não rejeita a hipótese nula de normalidade, mas quando $p < 0,05$ rejeita a hipótese nula de normalidade. Desse modo, somente os dados das camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,40-0,50 m e a RP máxima no perfil seguem distribuição normal, por não rejeitar a hipótese de nulidade (Tabela 3).

Os gráficos de distribuição de frequência com a curva normal ajudam a explicar os resultados dos valores obtidos para a As, k e o teste de normalidade (Figura 2). Pois a As pode ser observada pela dispersão dos dados em relação ao eixo “x”, a k pela distribuição no eixo “y”. As camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,40-0,50 m e RPMax foram consideradas normais pelo teste de Ryan-Joiner (Tabela 3), e ao observar os gráficos (Figuras 2a, 2b, 2e e 2g, respectivamente), verifica-se que os valores de RP na área seguem próximo o comportamento da curva normal. Para as camadas de 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,50-0,60 m e a profundidade da RPMax foram não significativas, e ao observar os gráficos (Figuras 2c, 2d, 2f e 2h, respectivamente) verifica-se que não há distribuição uniforme dos dados na área, o que faz que os mesmos não sigam a curva normal e apresentem curvas alongadas.

Os gráficos do Box-plot indicam pontos que fogem da nuvem de pontos, e que poderiam influenciar na modelagem, proporcionando as curvas como anormais, por algum teste de normalidade. Para a camada de 0,10-0,20 m observando-se pontos que estão fora do conjunto de dados (Figura 3b), no entanto foi considerada normal pelo teste Ryan-Joiner (Tabela 3). Assim, os pontos foram mantidos para a modelagem dos dados e confecção dos mapas de isolinhas. Para a camada de 0,20-0,30 m observam-se pontos fora do conjunto dos dados (Figura 3c), e neste caso a camada apresentou distribuição não significativa (Tabela 3), mesmo assim, os dados foram mantidos no conjunto para a análise espacial, pois, levando-se em consideração as características da variável em estudo, valores atípicos não poderiam ser desprezados (SILVEIRA et al., 2010), podendo indicar áreas com elevados valores de RP.

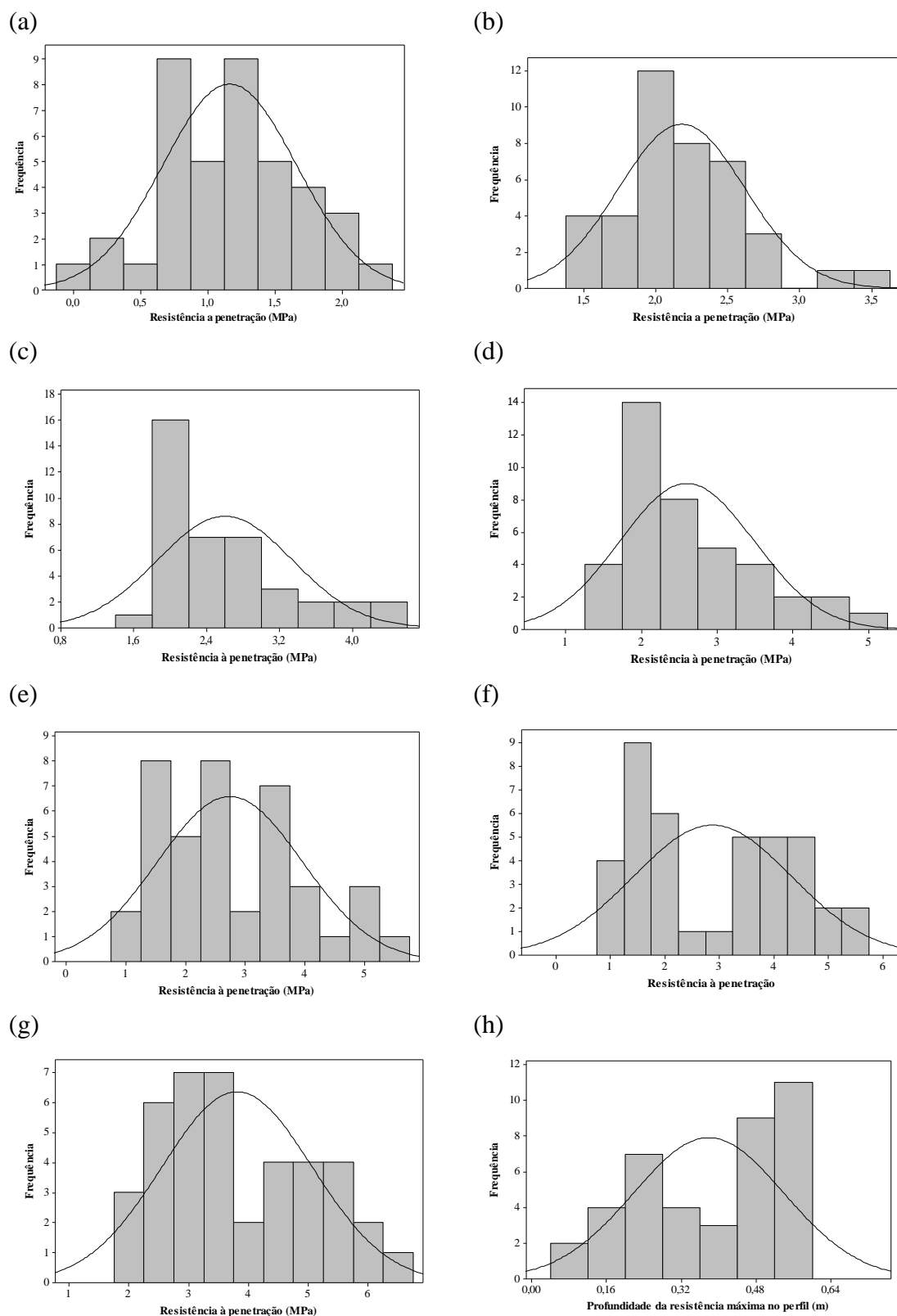


Figura 2. Distribuição de frequência com a curva normal para resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas camadas avaliadas: (a) 0,00 - 0,10 m; (b) 0,10 - 0,20 m; (c) 0,20 - 0,30 m; (d) 0,30 - 0,40 m; (e) 0,40 - 0,50 m e (f) 0,50 - 0,60 m; (g) Resistência máxima no perfil (MPa); (h) Profundidade da resistência máxima no perfil (m)

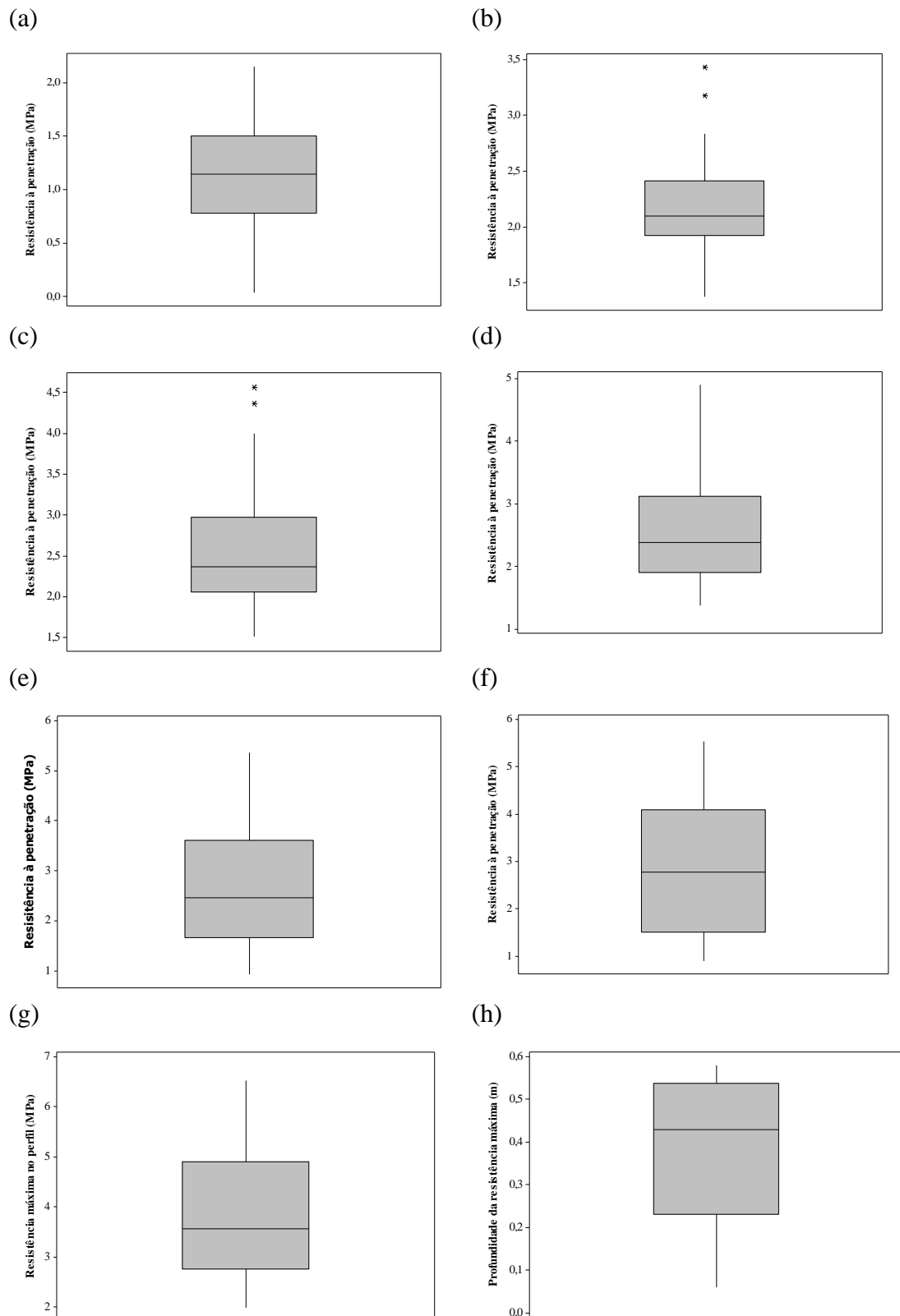


Figura 3. Box-plot para resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas camadas avaliadas: (a) 0,00 - 0,10 m; (b) 0,10 - 0,20 m; (c) 0,20 - 0,30 m; (d) 0,30 - 0,40 m; (e) 0,40 - 0,50 m e (f) 0,50 - 0,60 m; (g) Resistência máxima no perfil (MPa); (h) Profundidade da resistência máxima no perfil (m)

4.2 Resistência mecânica do solo à penetração - geoestatística

O ajuste do semivariograma para a RP foi o modelo esférico para todas as camadas avaliadas e para a resistência máxima no perfil (RPM_{max}) e a profundidade de ocorrência RPM_{max} ao longo da área avaliada (Tabela 4). Os ajustes apresentaram consideráveis percentuais de significância demonstrados pelos coeficientes de determinação (R^2) e pelos baixos valores da soma de quadrado de resíduos (SQR).

Tabela 4. Dados do semivariograma, da análise de dependência espacial e validação cruzada para resistência mecânica do solo à penetração nas camadas avaliadas.

Parâmetros	Camadas (m)							RPM _{max} (MPa)	Prof. RPM _{max} (m)
	0,00- 0,10	0,10- 0,20	0,20- 0,30	0,30- 0,40	0,40- 0,50	0,50- 0,60			
Semivariograma									
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	
Co	0,0001	0,06	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	
Co+C	0,23	0,17	0,40	0,57	0,82	1,14	1,23	0,02	
Alcance	25,50	36,40	32,00	59,80	37,70	42,30	89,10	68,40	
R^2	0,94	0,90	0,91	0,85	0,98	0,97	0,99	0,94	
SQR	0,0008	0,0005	0,01	0,02	0,004	0,025	0,005	0,00001	
Avaliador de dependência espacial (ADE)									
ADE	0,94	0,63	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,87	
Classe	Forte	Mod	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	
Validação cruzada									
B	0,14	0,53	0,82	0,95	0,63	0,72	0,87	0,93	
Reta	A	M	F	F	M	M	F	F	

Co = efeito pepita; Co+C = patamar; R^2 = coeficiente de determinação; SQR = soma dos quadrados dos desvios; ADE = avaliador da dependência espacial; Mod: Moderada. B: coeficiente angular da validação cruzada, A: reta aberta; M: reta medianamente aberta; F: reta fechada.

O alcance variou de 25,50 a 89,10 m (Tabela 4), e ao considerar a malha amostral utilizada de 20 x 20 m, pode-se afirmar que a malha foi adequada e o alcance das camadas indicam o ponto máximo da malha que poderia ser utilizado para a coleta de dados. Coelho et al. (2012) afirmam que os efeitos sobre o alcance vão depender do tipo e manejo de cada solo, além da quantidade e distribuição das amostras no campo.

Os valores de ADE permaneceram acima de 0,75 para as camadas de 0,00-0,10; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,60 m, RP máxima no perfil e profundidade a RP máxima e, entre 0,25 e 0,75 para a camada de 0,10-0,20 m (Tabela 4), o que, segundo Zimback (2001) é classificado, respectivamente, como forte e moderado grau de dependência espacial.

Os coeficientes angulares da validação cruzada apresentaram-se próximos a 1,0 (um), retas fechadas, para as camadas de 0,20-0,30; 0,30-0,40 m e RP máxima no perfil e a profundidade da RP máxima (Tabela 4), indicando relação próxima de equivalência entre os valores real e estimado (COELHO et al., 2012). As camadas de 0,10-0,20; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m apresentaram coeficiente angular entre 0,4 e 08, que indica retas medianamente abertas, indicando um ajuste médio. A camada de 0,00-0,10 m apresentou coeficiente angular menor do que 0,4, o que indica retas abertas. O fato da camada de 0,00-0,10 m apresentar retas abertas pode ser devido a maior variação da RP nesta camada.

Para os semivariogramas ajustados foi observado o maior coeficiente de determinação e o menor soma de quadrado dos desvios, com a observação do ajuste dos pontos a reta. Observa-se que os semivariogramas ajustados apresentaram pontos no caminhamento da reta, definindo o alcance e o patamar (Figura 4), o que caracterizou com elevados coeficiente de determinação, próximos a 1,0 (um).

Os mapas de isolinhas apresentam os valores de RP ao longo da área e por camada, e no gráfico da RPMax, observa-se os valores máximos no perfil na área que aliado ao gráfico da profundidade da RP máxima (Figura 5), indicam onde fazer a subsolagem e qual a profundidade que deve ser regulado o equipamento para cada parte da área. Na Tabela 5, observa-se a porcentagem de área para cada classe de cor, que varia para cada camada analisada.

Na camada de 0,00-0,10 m, os níveis de RP se mantiveram em 2,0 MPa (Figura 5a), que pode ser caracterizado sem compactação, pois segundo Ribeiro (2009) a RP pode ser baixo (0 a 2 MPa); médio (2 a 4 MPa); alto (4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa). Nesta camada aproximadamente 50% da área apresentou níveis de RP entre 1,0 e 1,5 MPa (Tabela 5). Considerando que para solos sem mobilização periódica, pode-se admitir valores de até 4,0 MPa para RP, essa camada não apresenta problemas de compactação.

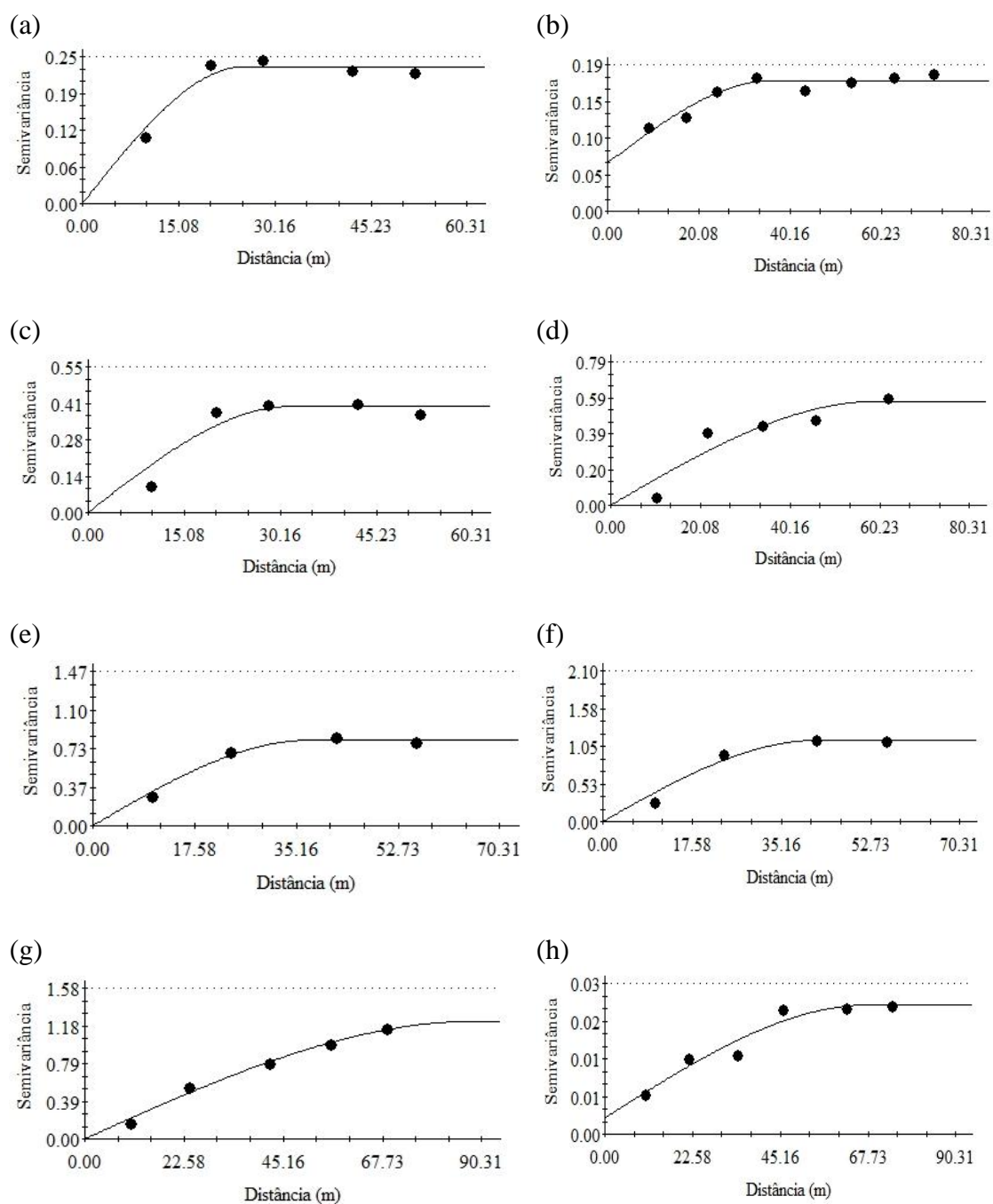


Figura 4. Semivariograma para resistência mecânica do solo a penetração nas camadas avaliadas: (a) 0,00 - 0,10 m; (b) 0,10 - 0,20 m; (c) 0,20 - 0,30 m; (d) 0,30 - 0,40 m; (e) 0,40 - 0,50 m e (f) 0,50 - 0,60 m; (g) Resistência máxima no perfil (MPa); (h) Profundidade da resistência máxima no perfil (m).

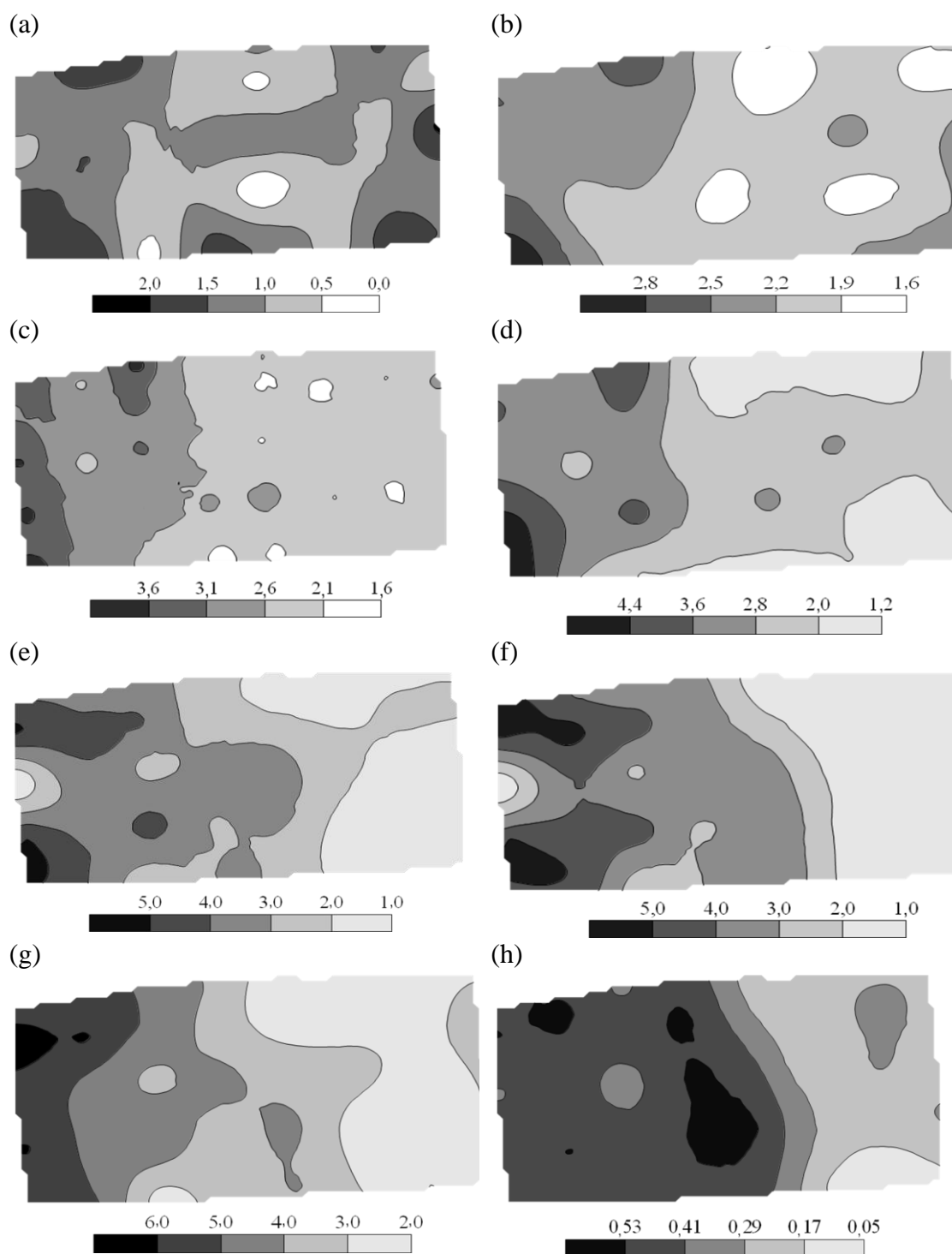


Figura 5. Mapas de Krigagem para resistência mecânica do solo a penetração (MPa) nas camadas avaliadas: (a) 0,00 - 0,10 m; (b) 0,10 - 0,20 m; (c) 0,20 - 0,30 m; (d) 0,30 - 0,40 m; (e) 0,40 - 0,50 m e (f) 0,50 - 0,60 m; (g) Resistência máxima no perfil (MPa); (h) Profundidade da resistência máxima no perfil (m).

Tabela 5. Porcentagem de área ocupada pelos diferentes níveis de resistência mecânica do solo à penetração e da profundidade nas camadas avaliadas.

Camada (m)	Percentual (%)				
0,00-0,10	0,00	10,76	48,43	38,38	2,43
0,10-0,20	0,75	4,57	30,78	51,93	11,97
0,20-0,30	0,65	9,35	27,99	60,10	1,91
0,30-0,40	1,51	6,71	25,54	43,59	22,65
0,40-0,50	1,03	9,74	33,73	28,06	27,44
0,50-0,60	4,62	9,24	34,03	18,63	33,48
RP Max no perfil	1,61	13,93	22,12	30,58	31,76
Prof. da RP Max	7,57	49,93	12,10	26,67	3,73

A camada de 0,10-0,20 m apresentou classe de valor máximo maior que 2,8 MPa (Figura 5b), no entanto apenas 0,75% da área continham esses valores (Tabela 5). A maior parte da área apresentou valores de RP entre 1,9 e 2,5 MPa o que corresponde a 82,71% da área, sendo classificada a RP como média (RIBEIRO, 2009).

A camada de 0,20-0,30 m apresentou classe de valor máximo maior que 3,6 MPa (Figura 5c), no entanto apenas 0,65% da área continham esses valores (Tabela 5). A maior parte da área apresentou valores de RP entre 2,1 e 3,1 MPa o que corresponde a 88,09% da área, sendo classificada a RP como média (RIBEIRO, 2009).

A camada de 0,30-0,40 m apresentou classe de valor máximo maior que 4,4 MPa (Figura 5d), no entanto apenas 1,51% da área continham esses valores (Tabela 5), sendo necessário à realização da subsolagem em apenas nesta área. A maior parte da área apresentou valores de RP entre 2,0 e 2,8 MPa o que corresponde a 43,59% da área, sendo classificada a RP como média (RIBEIRO, 2009).

A camada de 0,40-0,50 m apresentou classe de valor máximo maior que 5,0 MPa (Figura 5e), no entanto apenas 1,03% da área continham esses valores (Tabela 5). Considerando o limite de 4,0 MPa para realização da subsolagem apenas 10,77% da área precisaria fazer a operação a 0,60 m, considerando 0,10 m a mais como medida de segurança para completa remoção da camada compactada. A maior parte da área apresentou valores de RP entre 3,0 e 4,0 MPa o que corresponde a 33,73% da área, sendo classificada a RP como média (RIBEIRO, 2009).

A camada de 0,50-0,60 m apresentou classe de valor máximo maior que 5,0 MPa (Figura 5f), no entanto apenas 4,62% da área continham esses valores (Tabela 5). Considerando o limite de 4,0 MPa para realização da subsolagem apenas 13,86% da área precisaria fazer a operação a 0,70 m, considerando 0,10 m a mais como medida de segurança para completa remoção da camada compactada. A maior parte da área apresentou valores de RP entre 3,0 e 4,0 MPa o que corresponde a 34,03% da área, sendo classificada a RP como média (RIBEIRO, 2009).

A RP máxima no perfil do solo chegou a níveis acima de 6,0 MPa (Figura 5g), representando 1,61% da área (Tabela 5). Considerando o limite de 4,0 MPa para realização da subsolagem, a operação deveria ser feita em 37,66% da área. Na agricultura convencional teria se feito a opção por subsolar a área toda ou não fazer a operação, na opção de fazer a operação, o uso da agricultura de precisão permitiu uma economia de tempo, mão de obra, combustíveis que seriam gastos na maior parte da área, 62,34%, que apresentou RP de até 4,0 MPa.

A profundidade da RP máxima ocorreu na sua maior parte, 49,93% (Tabela 5), entre 0,41-0,53 m (Figura 5h), que coincide com as áreas que precisam fazer a remoção da camada compactada (Figura 5g). Se considerarmos a agricultura convencional, utilizar-se-ia a regulagem da profundidade baseado na média da camada compactada, 0,38 m mais 0,10 m, como segurança para remoção da camada compactada, totalizando 0,48 m de profundidade. Com a agricultura de precisão verificou-se que existe uma variação na profundidade de ocorrência que varia até mais de 0,53 m, chegando a 0,58 m (Tabela 3).

Portanto, o uso da agricultura de precisão permitiu identificar a variabilidade espacial da RP na área e verificar que apenas 37,66% da área apresentava níveis acima de 4,0 MPa que precisam fazer a remoção da camada compactada, e que está se encontra aproximadamente entre 0,41-0,53 m.

Os problemas de aumento da resistência mecânica do solo à penetração, causando compactação em camadas subsuperficiais verificados na área podem ser atribuídos a três fatores: tipo de solo, classe textural, que o torna mais ou menos susceptível a compactação, as áreas em perfil com maior percentual de argila nas camadas de 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50 m do perfil do solo, que demonstraram maior susceptibilidade ao aumento da RP; tempo do sistema plantio direto, para o

maior tempo de uso deste sistema resulta no acréscimo da RP; e o tráfego de máquinas, principalmente nas cabeceiras, potencializa o processo de compactação.

Com base nos estudos realizados neste trabalho, e considerando que atividades de intervenção mecânica em áreas de sistema plantio direto consolidado, tais como aração e escarificação, caracterizam-se como operações de custo relativamente alto em função da potência requerida, recomenda-se fazer um estudo minucioso de custo/benefício antes de se pensar nestas operações para resolver supostos problemas de compactação do solo em áreas manejadas sob SPD. Nessa análise de verificação da necessidade de intervenção mecânica para descompactação do solo deve ser levada em consideração a capacidade de infiltração de água no solo, uma vez que sua manutenção em níveis adequados possui potencial de promover redução da perda de solo por erosão hídrica e incremento do armazenamento de água no solo.

Analisando os fenômenos associados à variabilidade existente nos campos e as formas de intervir ou conviver positivamente com essa variabilidade, juntamente com redução de custos para otimizar a produção ou resolver os problemas decorrentes desta variabilidade, faz-se necessária à adoção da agricultura de precisão para que a produção se torne sustentável.

5 CONCLUSÕES

1. Houve maior variação na camada de 0,50-0,60 m, tendo todas as camadas com avaliador de dependência espacial (ADE) forte, com exceção da camada de 0,10-0,20 m com ADE moderada e com maiores alcances nas camadas de 0,30–0,40 e 0,50-0,60 m.

2. Houve incremento da resistência mecânica do solo à penetração (RP) atingindo níveis máximos principalmente entre 0,38 e 0,58 m.

3. Os métodos geoestatísticos permitiram o zoneamento da área, definindo regiões específicas com maiores índices de resistência mecânica à penetração (RP), o que possibilita uso de técnicas de agricultura de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. I. F.; Introdução à análise exploratória de dados. **ESALQ/USP, DME**, Piracicaba, 1987. 40p.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L.; Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia** (Impresso), v. 5, p. 187-206, 2012.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; Efeito de sistemas de preparo e de culturas na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.24, n.3, 2000b, 599-607p.

BLACKWELL, D.; Estatística básica. **EDUSP**, 2.ed. São Paulo:, 1975. 143p.

BRADY, N. C.; **Natureza e propriedade dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Barros, 898 p. 1989.

CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H.; Spatial analysis of fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1240-1248, 1994.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.; Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CARR, P. M.; CARLSON, G. R.; JACOBSON, J. S.; NIELSON, G. A.; SKOGLEY, E. O. Farming fields, not soils: A strategy for increasing fertilizer profitability. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 4, p. 57-61, 1991.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas – **Embrapa Milho e Sorgo** ISSN1518-4277. Sete Lagoas, 2005.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; Variabilidade espacial da resistência mecânica a penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.36 n.3, p.755-763, 2012.

COSTA, L. M.; MATOS, A. T.; Impactos da Erosão do Solo em Recursos Hídricos. In: D. D. Silva; F. F. Pruski (Orgs.) **Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura**. Brasília: MMA/SRH e ABEAS, Viçosa: UFV, 1997.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. Atributos físicos de um Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.35, n.4, p.1207-1216, 2011.

- CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900p.
- CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; SANTANA, D. P.; Plantio Direto e Sustentabilidade do Sistema Agrícola. **Informe Agropecuário**, v. 22, n.208, p. 13-24, 2001.
- CUNHA, J. P. A. R. da; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J.; O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.175-182, mar./abr. 1996.
- DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J.; REINERT, D. J. ; DRESCHER, G. L.; Efeito residual da descompactação mecânica em Latossolo manejado sob sistema plantio direto sobre o rendimento da cultura da soja. In: **XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**, 2012, Lages - SC. Conservação do Solo e da água no Brasil: preceitos e ações no ensino, na pesquisa e na extensão, 2012.
- ECCO, M. ; CARVALHO, L. A. ; FERRARI, L. P.; Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2008/2009. **Agrarian** - Dourados. Online, v. 5, p. 263-269, 2012.
- EGUCHI, E. S.; Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos de um solo hidromórfico no município de Lavras MG. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001. 85p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de Pesquisas de Solos**. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: **Centro Nacional de Pesquisas de Solos**, 2006. 370p.
- FALKER. PenetroLOG PLG1020 - Medidor Eletrônico de Compactação do Solo. Disponível em: < <http://www.falker.com.br/download.php>> . Acessado em 23 set 2010.
- FARIAS, M. S. S.; Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999. Paraíba, 75p.
- FERREIRA, P. H. de M.; **Princípios de manejo e conservação do solo**. São Paulo: Nobel, 135 p. 1992,

FOLEGATTI, M. V.; Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso, **Tese** (Livre - Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1996. Piracicaba, 84p.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca. **Embrapa Soja**. Londrina, 2009. 39 p.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1 p. 65-73, 2009.

GONÇALVES, A. C. A.; Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997. 118p.

GROENEVELT, P.H., KAY, B.D., GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 101-14, 1984.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. (Publicação Didática). Uberlândia: UFU, 2001. 48p.

HAKANSSON, I & VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. **Methods for assesment of soil degradation**. Boca Raton, Lewis Publishers, 1996. p.167-79.

HAMLETT, D. L.; HORTON, R.; CRESSIE, N.A.C.; Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. **Soil Science Society of America Journal**, 50, p.868-875, 1986.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, june, 2005.

INOUE, G. H.; Sistema de preparo do solo e o plantio direto. **Agropecuária Técnica** (UFPB), UFPB, v. 24, n.1, p. 1-11, 2003.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relação solo-água-planta. **Agronômica Ceres**. São Paulo, 1979. 262p.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. **Fundação Editora da UNESP**. São Paulo, 1998. 226p. (Ciência e Tecnologia).

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E.; Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações. **Agropecuária**, Guaíba 2001. 118p.

LARSON, W. E.; ROBERT, P. C. Farming by soil. In: LAL, R.;PIERCE, F. J. (Ed.). Soil management for sustainability. **Soil and Water Conservation Society**, Ankeny 1991. p. 103-112.

LOPES, O.; Plantio direto agroecológico. Embrapa, 2008. Disponível em:<<http://hotsites.sct.embrapa.br/diacampo/programacao/2008/plantio-direto-ecologico>>.Acesso em: 08 jul. 2013.

MATA, J. D. V.; Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada, sob dois sistemas de preparo, cultivada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997. 73p.

MERNES, F. J. V.; SOUZA, C. M.; CARDOSO, A. A. ;ROCHA, V. S. ; GALVAO, J. C. C. ; PIRES, F. R. . Influência de diferentes métodos de preparo do solo na sua resistência à penetração. **Revista Ceres**, v. 50, p. 143-153. Viçosa, 2003

MULLA, D.J.; Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. Soil specific crop management. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1993. p.15-26.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 1-18.

NIERO, L. A. C.; Avaliações visuais do solo como índice de qualidade de um Latossolo Vermelho em oito usos e manejos e sua validação por análises físicas e químicas. **Dissertação** (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Pós-Graduação – IAC. Campinas, 2009. 111f

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B.; Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência a penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 35, p. 417-428, 2011.

PAZ, A.; TABOADA, M.T.; GÓMEZ, M.J.; Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.27, n.3/4, p.479-503, 1996.

PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA,1997.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p. 1-85, 1999

PREVEDELLO, B. M. S.; **Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta.** Piracicaba, 1987. 166p. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

REICHENBERG, I., & RUSSNOGLE, J. Farming by foot. (I. REICHENBERG, & J.RUSSNOGLE, Eds.) **Farmer's Journal**, 113, pp. 11-15.

RIBEIRO, C. A.; Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas em função do número de cortes da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, São Paulo, 2009. 69 p

ROSA, V. T.; Tempo de implantação do sistema Plantio Direto e propriedades físico-hídricas de um Latossolo. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) Centro de Ciências do Solo – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria 2011. 101f.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; Compactação do solo: Consequências para o crescimento vegetal. **Embrapa Cerrados**, Planaltina 2005. 26p.

SALVIANO, A. A. C.; Variabilidade de atributos de solo e de Crotalária juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1996. 91p.

SALIRE, E.V., HAMMEL, J.E., HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Till. Res.**, Amsterdam, v.31 p. 235-48, 1994.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G.; Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da Crotalária Juncea em área de erosão acelerada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.115-122. Viçosa, 1995.

SANTOS, B. G.; Resistência Mecânica de um solo cultivado com algodoeiro em sistema de preparo convencional em Ipameri, GO. In: V Congresso Brasileiro de Algodão, **Anais do V Congresso Brasileiro de Algodão**. Salvador, 2005.

SAWYER, J. F. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 7, p. 195-201, 1994.

SCHUELLER, J. K. In-field site-specific crop production. In:**AUTOMATED AGRICULTURE FOR THE 21ST CENTURY SYMPOSIUM**, 1991. Proceedings. (ASAE. Publication, 11-91). St. Joseph:ASAE, p. 291-292. Chicago, 1991.

SCOTT, H.D.; MAUROMOUSTAKOS, A.; HANDAYANI, I.P.; MILLER, D.M. Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1531-1538, 1994.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O.; Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), Viçosa, v. 28, p. 797-804, 2004.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. e PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal.**, 58:1775- 1784, 1994.

SILVA, A.P.; Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1988. 105p.

SILVA JÚNIOR, M. C.; Composição florística, estrutura e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba, MG. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. 2001, 1984. 130p.

SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F.; SACRAMENTO, J.A.A.S; SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.34, p.659-667, 2010.

SIQUEIRA, N. S.; Influência de sistemas de preparo sobre algumas propriedades químicas e físicas do solo e sobre a cultura do milho (*Zea mays* L.). **Tese** (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 78 p. 1995.

SOARES, A. de A. O índice de capacidade multivariado como instrumento para avaliação do processo em uma operação de usinagem. **Tese** (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2006. 114f.

SOUZA, L. C. de.; Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1999. 77p.

SOUZA, L. S.; **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1992. 162p.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F. e FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays* – L.) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:725-730, 2001.

TAYLOR, N.W. **Root behavior as affected by soil structure and strenght.** In: CARSON, E.W.(Ed.) *The plant root and its enviroment.* Charlottesville, University, Press of Virginia.p.271-91, 1974.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 22:573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p.333-339, 1996.

TORRE NETO, A. ; JORGE, L. A. C.; Agricultura de Precisão. In: **Workshop o Agronegócio na sociedade da informação, 2002**. Agrosoft. Brasília, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GALERANI, P. R.; Manejo do solo para a cultura da soja. Embrapa-CNPSO, Londrina. 71p, 1993.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de Impedimento Mecânico do Solo em Sistemas Agrícolas com a Soja. **Embrapa Soja**. Londrina, PR.

TABOR, J.A.; WARRICK, A.W.; PENNINGTON, D.A.; MYERS, D.E.; Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.602-607, 1984.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R.; The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.175-184, 1983.

VIEIRA, S.R.; **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1998.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C.; Uso de geoestatística no mapeamento de atributos de solo e planta (compact disc). In: **CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA - GIS BRASIL 98**, 4., Curitiba, 1998. Anais. Curitiba, 1998.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, n.6, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. Hilgardia, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. de; DECHEN, S. C. F.; LOMBARDI NETO, F.; Utilização da análise de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva na crotalária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, n.7, p.7-10, Viçosa 1987.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, J.M.

Tópicos em Ciência do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.1-45. Viçosa, 2002

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R.; Spatial variability of some physical properties of the soil. In: Hillel, D. ed. **Applications of soil physics**, New York: Academic Press, 1980, Cap. 13, p.319-344.

ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. **Tese** (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - FCA-UNESP. 114f. Botucatu, 2001.