

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO
CORRELACIONADOS COM ATRIBUTOS DO SOLO SOB
SISTEMAS DE MANEJO DE ELEVADO NÍVEL
TECNOLÓGICO**

Rafael Montanari
Engenheiro Agrônomo

ILHA SOLTEIRA
ESTADO DE SÃO PAULO
JUNHO - 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

**ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO
CORRELACIONADOS COM ATRIBUTOS DO SOLO SOB SISTEMAS
DE MANEJO DE ELEVADO NÍVEL TECNOLÓGICO**

Rafael Montanari
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –
UNESP - Campus de Ilha Solteira para a
obtenção do título de DOUTOR EM
AGRONOMIA, especialidade: Sistemas de
Produção.

Ilha Solteira-SP
Junho/2009



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO CORRELACIONADOS COM ATRIBUTOS DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO DE ELEVADO NÍVEL TECNOLÓGICO

AUTOR: RAFAEL MONTANARI

ORIENTADOR: Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em AGRONOMIA ,
Área: SISTEMAS DE PRODUÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ORIVALDO ARF

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. GENEZ TADEU PEREIRA

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. EDNALDO CARVALHO GUIMARAES

Departamento de Matemática / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 25 de junho de 2009.

DEDICO

Aos meus pais, **“Dorvair Montanari e Maria do Rosário André Montanari”**, que me educaram e me deram a oportunidade para mais esta conquista em minha vida, que nos momentos difíceis, me compreenderam e me incentivaram, demonstrando todo carinho, respeito, confiança e amor que sentem por mim.

AMO VOCÊS

Agradeço
a Deus,
por sempre estar ao meu lado e me
ensinar a percorrer os caminhos da vida

OFEREÇO

Ao meu irmão **Alexandre Montanari**, pelo carinho e confiança depositada e também por superar algumas dificuldades em meu lugar.

***“SE EU CONSEGUI ENXERGAR MAIS
LONGE, É PORQUE ME APOIEI SOBRE
OMBROS DE GIGANTES”***

(Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu alcançar este enorme sonho de minha vida e por me dar forças para superar as dificuldades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida no exterior.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Sistemas de Produção, pelo amparo e pelas condições de aprendizado oferecido ao longo do curso.

À Universidade Da Coruña (UDC) e à Universidade de Santiago de Compostela (USC), pelo acolhimento e pelas condições de aprendizado oferecido em meu estágio de doutoramento na Espanha.

Ao **Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho**, pela valiosa orientação acadêmica dedicada na realização de meu doutorado, revelando-me autêntica demonstração de profissionalismo, competência, humildade, confiança e companheirismo à minha pessoa, a quem considero não só como um grande amigo, **mas como um exemplo de vida**.

Aos professores membros da banca examinadora, Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho, Prof. Dr. Marcelo Andreotti, Prof. Dr. Orivaldo Arf, Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira e Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães pelas brilhantes sugestões apresentadas e pelo auxílio prestado nesta minha caminhada.

À **Profª. Drª. Marlene Cristina Alves**, pela grande amizade e por toda a contribuição para o meu desenvolvimento profissional.

Ao Prof. Dr. Antonio Paz González, pelo acolhimento e pela valiosa colaboração em meu estágio de doutoramento na Espanha.

Ao Prof. Dr. Jorge Dafonte Dafonte, pelo auxílio e orientação quando estive trabalhando na Universidade de Santiago de Compostela (USC/Lugo).

Ao Prof. Dr. Pedro César dos Santos, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Ao amigo Glécio Machado Siqueira pela hospitalidade na cidade de Lugo e pelas ajudas nas publicações dos trabalhos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos do Campus de Ilha Solteira e ao técnico Valdivino, por toda a ajuda, paciência e ensinamentos.

A todos os amigos que, nos vários dias de sol forte, me ajudaram na coleta de dados de campo; **MUITÍSSIMO OBRIGADO**.

A todos os amigos da Universidade da Coruña (UDC), pelo acolhimento em minhas estâncias realizadas.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa e do Laboratório de Fertilidade do Solo: Juninho, Alvino, Joãozinho, Buchada, Teginho e Carlinhos, pelo apoio prestado.

Aos amigos Zigomar Menezes de Souza, Igor Malaspina, Renato Franco, Jefferson Anselmo, Hernandes Queiroz, Talles Eduardo Borges dos Santos, Máila Terra Gioia, Edmar Casarin Zambianco, João Henrique Buschin e Márcia Lima com quem convivi durante o Doutorado, pelas várias experiências e pelos risos de descontração.

A Nídia Raquel Costa pela enorme amabilidade; obrigado pela atenção e paciência.

Aos meus grandes amigos do outro lado do oceano Atlântico: Baku Akazawa, Piero Maletta, Simone Tarsitano, Francesco Concia, que compartilharam momentos inesquecíveis em minha vida, me ajudando em momentos de dificuldade (**Gracias hermanos...**).

Às pessoas especiais que partiram e agora me auxiliam nos caminhos da vida.

A todos os demais profissionais envolvidos nesta pesquisa, bem como àquelas pessoas que por algum motivo tornaram a minha passagem na FEIS/UNESP – Campus de Ilha Solteira, mais prazerosa, presto os meus agradecimentos e reafirmo a certeza que vou, para sempre, tê-los por lembranças.

MONTANARI, R. **Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico**. Ilha Solteira, 2009. 172f. Tese. (Doutorado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

RESUMO

No Brasil, a cultura do feijoeiro constitui-se numa das mais representativas explorações agrícolas, não só sua pela área de cultivo como também pelo valor econômico de sua produção. No ano agrícola de 2006/07, no município de Selvíria (MS), foi analisada a produtividade de grãos do feijoeiro, em função de alguns atributos de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado nas condições de elevado nível tecnológico de manejo, representados pelo sistema cultivo mínimo e pelo sistema plantio direto, e irrigado com pivô central. Os objetivos foram: a) analisar, nos dois sistemas de manejo empregados, a diferença de produtividade de grãos do feijoeiro, embasada nas diferenças existentes entre os valores médios dos atributos do solo trabalhado, e b) definir o atributo do solo para os dois sistemas de preparo, que melhor se apresente para explicar a variabilidade da produtividade de grãos do feijoeiro. Para tanto, foram instaladas duas malhas geoestatísticas, uma para cada sistema de manejo, para a coleta de dados do solo e da planta, com 117 pontos amostrais cada, numa área de 2025 m² e declive homogêneo de 0,055 m m⁻¹. Os resultados mostraram que, em relação ao sistema cultivo mínimo do solo, no sistema plantio direto ocorreu um aumento da heterogeneidade dos atributos da planta. Já em relação aos do solo, ocorreu aumento da homogeneidade. Também, a menor produtividade de grãos do feijoeiro, ocorrida no sistema cultivo mínimo do solo, foi provavelmente devido a uma menor densidade de plantas que esse sistema proporcionou. Ainda que no sistema plantio direto o solo cultivado estivesse mais compactado, evidenciado, sobretudo, pelos maiores valores da densidade do solo, resistência à penetração e umidade volumétrica, nele ocorreu maior e significativa produtividade de grãos do feijoeiro. Dessa forma, tal produtividade pôde ser explicada, para os sistemas cultivo mínimo do solo e plantio direto, por modelos matemáticos de elevada significância, respectivamente dados em função da porosidade total e da densidade da partícula do solo. Especialmente falando, apenas para o sistema plantio direto, a produtividade de grãos do feijoeiro pôde ser estimada por meio da co-krigagem com o valor do pH do solo. Assim, valores do pH na faixa de 5,0-5,4 indicaram sítios com as maiores produtividades de grãos do feijoeiro, estabelecidas entre 2200-2600 kg ha⁻¹.

Termos de indexação: manejo do solo, sistema cultivo mínimo, sistema plantio direto, qualidade física do solo, qualidade química do solo, sustentabilidade agrícola, *Phaseolus vulgaris*.

MONTANARI, R. **Aspects of common bean crop productivity correlated with soil attributes on management conditions of high technological level.** Ilha Solteira, 2009. 172p. Tesis. (Doctor Degree of Systems of Production) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

ABSTRACT

In Brazil, the common bean crop is one of the most representative agriculture explorations, not just for its cultivation area, as well as for its production value. The common bean crop productivity was analyzed in function of some attributes of a Dystroferic Red Latosol (Typic Acrustox) in the agriculture year 2006/07, in Selviria County, Mato Grosso do Sul State, Brazil. It was cultivated with high technological level of management conditions by minimal tillage and no-tillage systems, irrigated by central pivot. The objectives were: a) to analyze both systems in order to obtain the difference of the common bean grains productivity, based on the existent differences among the medium values of the cultivated soil attributes, and b) to define on both systems the soil attribute that better showed the variability of the grains productivity. Two geostatistical grids were installed - one for each management system - to have the soil and plant data collected, with 117 sampling points each, in an area of 2025 m² and homogeneous slope of 0.055m m⁻¹. Therefore, in relation to the minimal tillage system, on the no-tillage system, an increasing on the heterogeneity of the plant attributes occurred. By the other hand, there was a homogeneity increasing of the soil attributes. A minor common bean grains productivity also occurred. Due to the minor plant density provided by this system, the soil minimum tillage system, a minor bean grains productivity also occurred. Even if in the no-tillage area where the soil was more compacted, fact showed by the higher values of the bulk density and by the index cone as well as by the volumetric moisture, a major and expressive bean grains productivity occurred. So, for both soil tillage crop and no-tillage systems, such productivity could be explained through high significative mathematic models, respectively showed in function of total porosity and soil particle density. In relation to the spatial aspect, only for the no-tillage system, the common bean grains productivity could be estimated by cokriging with the soil pH value. This way, values of pH of 5.0–5.4 showed places with the highest bean grains productivities around 2200–2600 kg ha⁻¹.

Index terms: soil management, minimal tillage system, no-tillage system, physical quality of soil, chemical quality of soil, agricultural sustainability, *Phaseolus vulgaris*.

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1 Exemplo de semivariograma experimental, com os parâmetros C_0 (efeito pepita), C_0+C (patamar) e (A_0) alcance.....	42
2 Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.....	48
3 Aspecto geral da área experimental implantada com a cultura do feijoeiro sob pivô central.....	53
4 Curva da resistência à penetração e valores da umidade gravimétrica nas três camadas estudadas do solo.....	57
5 Esquema da malha experimental de campo.....	60
6 Vista geral da cultura do feijoeiro no início do desenvolvimento, sob sistema cultivo mínimo do solo.....	63
7 Vista geral da cultura do feijoeiro no final do desenvolvimento, sob sistema cultivo mínimo do solo.....	63
8 Vista geral da cultura do feijoeiro no início do desenvolvimento, sob sistema plantio direto	64
9 Vista geral da cultura do feijoeiro no final do desenvolvimento, sob sistema plantio direto	64
10 Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro sob cultivo mínimo	95
11 Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	96

12	Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	99
13	Semivariogramas simples dos atributos da produtividade do feijão (#PRG, NVP, NGV, #NGP, MCG) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, DS2 e #DS3) sob cultivo mínimo	103
14	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, #RP1 e RP2) sob cultivo mínimo	104
15	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (RP3, UG1, UG2, UG3, #UV1, UV2, UV3 e MO1) sob cultivo mínimo	105
16	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO2, #MO3, #P1, #P2, #P3, pH1, pH2 e pH3) sob cultivo mínimo	106
17	Semivariogramas simples dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP, NGV, NGP, MCG) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, DS2 e DS3) sob plantio direto	110
18	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, RP1 e RP2) sob plantio direto	111
19	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV2, UV3 e MO1) sob plantio direto	112
20	Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO2, MO3, P1, P2, P3, pH1, pH2 e pH3) sob plantio direto	113
21	Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS2, #DS3, RP2, RP3, UG2 e UG3) sob cultivo mínimo	116

22	Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UV2, UV3, #P1, #P2, #P3, pH1, pH2 e pH3) sob cultivo mínimo	117
23	Validação cruzada dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP e NGV) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, RP3 e UG1) sob plantio direto	120
24	Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UG2, UV1, MO1, MO2, MO3 e P1) sob plantio direto	121
25	Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (P2, P3, pH1, pH2 e pH3) sob plantio direto	122
26	Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS2, £DS3, RP2, RP3, UG2 e UG3) sob cultivo mínimo	123
27	Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UV2, UV3, £P1, £P2, £P3, pH1, pH2 e pH3) sob cultivo mínimo	124
28	Mapas de krigagem dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP e NGV) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, RP3, UG1, UG2 e UV1) sob plantio direto	126
29	Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO1, MO2, MO3, P1, P2 e P3) sob plantio direto	127
30	Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (pH1, pH2 e pH3) sob plantio direto	128
31	Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do NVP em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	131

32	Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do UG2 em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	132
33	Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do P2 em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	133
34	Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do P3 em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	134
35	Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do pH1 em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	135

LISTA DE QUADROS

Quadros		Página
1	Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado.....	54
2	Análise inicial de alguns atributos físicos do solo estudado.....	56
3	Análise inicial de alguns atributos químicos para fins de fertilidade do solo estudado.....	56
4	Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	67
5	Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	74
6	Teste F aplicado aos atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo e plantio direto	82
7	Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	85
8	Terceiro quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	86
9	Quarto quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	87

10	Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	90
11	Terceiro quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	91
12	Quarto quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	92
13	Equações e coeficientes da regressão entre atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	94
14	Equações e coeficientes da regressão entre atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	98
15	Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	101
16	Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	102
17	Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	108
18	Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	109

19	Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo	115
20	Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	119
21	Parâmetros dos semivariogramas cruzados e validações cruzadas de atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto	130

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice	Página
A (a) Área experimental antes da implantação do experimento; (b) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência à penetração, e (d) Coleta de amostras deformadas do solo.....	167
B (a) Instalação do experimento ; (b) 14 DAS (c) 34 DAS; (d) 56 DAS; (e) 66 DAS, e (f) Experimento colhido sob cultivo mínimo	168
C (a) Instalação do experimento; (b) 14 DAS (c) 34 DAS; (d) 56 DAS; (e) 66 DAS, e (f) Experimento colhido sob plantio direto	169
D (a) 80 DAS; (b) Estaqueamento da malha, 26 DAS; (c) Dia da colheita, 98 DAS; (d) Área colhida de 3,24m ²	170
E Esquema de campo da malha experimental de coletas de dados seqüencialmente, do ponto amostral 1 até o 117.....	171
F Quadro com as coordenadas cartesianas dos pontos amostrais da malha experimental.....	172

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO.....	24
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1 Aspectos gerais da cultura do feijoeiro.....	26
2.2 Solo agrícola ideal.....	27
2.2.1 Densidade do solo.....	27
2.2.2 Densidade da partícula sólida.....	29
2.2.3 Porosidade total.....	30
2.2.4 Resistência mecânica à penetração e umidade.....	32
2.2.5 Matéria orgânica.....	33
2.2.6 Fósforo.....	34
2.2.7 Potencial hidrogeniônico.....	35
2.3 Sistemas de preparo do solo para a cultura do feijoeiro.....	36
2.3.1 Preparo convencional do solo.....	37
2.3.2 Sistema cultivo mínimo.....	37
2.3.3 Sistema plantio direto.....	38
2.4 A geoestatística na pesquisa agrônômica.....	39
2.4.1 Semivariograma.....	41
2.4.2 Krigagem.....	44
2.4.3 Semivariograma cruzado.....	45
2.4.4 Co-krigagem.....	46
2.4.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade.....	46
2.4.6 Variabilidade espacial aplicada à cultura do feijoeiro e aos solos.....	48
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1 Caracterização do local de origem dos dados.....	53
3.2 Caracterização inicial do solo estudado.....	55
3.3 Implantação e condução da cultura do feijoeiro.....	58
3.4 Implantação e caracterização das malhas experimentais de campo.....	58
3.5 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados.....	59
3.6 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1 Análise descritiva dos dados.....	66

4.1.1 Cultivo mínimo.....	66
4.1.1.1 Variabilidade dos atributos.....	66
4.1.1.1.1 Atributos da planta.....	66
4.1.1.1.2 Atributos do solo.....	66
4.1.1.2 Distribuição de frequência dos atributos.....	69
4.1.1.2.1 Atributos da planta.....	69
4.1.1.2.2 Atributos do solo.....	70
4.1.1.3 Valores médios dos atributos estudados.....	71
4.1.1.3.1 Atributos da planta.....	72
4.1.1.3.2 Atributos do solo.....	72
4.1.2 Plantio direto.....	73
4.1.2.1 Variabilidade dos atributos.....	73
4.1.2.1.1 Atributos da planta.....	73
4.1.2.1.2 Atributos do solo.....	75
4.1.2.2 Distribuição de frequência dos atributos.....	77
4.1.2.2.1 Atributos da planta.....	77
4.1.2.2.2 Atributos do solo.....	77
4.1.2.3 Valores médios dos atributos estudados.....	79
4.1.2.3.1 Atributos da planta.....	79
4.1.2.3.2 Atributos do solo.....	79
4.1.3 Análise da variabilidade, distribuição de frequência e valores médios entre os tratamentos.....	80
4.2 Análise da significância estatística entre os atributos do cultivo mínimo e do plantio direto.....	81
4.2.1 Atributos da planta.....	81
4.2.2 Atributos do solo.....	83
4.2.3 Comparações entre os tratamentos.....	83
4.3 Análise de regressão entre os atributos.....	84
4.3.1 Regressão linear simples.....	84
4.3.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos.....	84
4.3.1.1.1 Cultivo mínimo.....	84

4.3.1.1.1.1	Atributos da planta <i>versus</i> atributos da planta.....	84
4.3.1.1.1.2	Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	84
4.3.1.1.1.3	Atributos do solo <i>versus</i> atributos do solo.....	88
4.3.1.1.2	Plantio direto.....	88
4.3.1.1.2.1	Atributos da planta <i>versus</i> atributos da planta.....	89
4.3.1.1.2.2	Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	89
4.3.1.1.2.3	Atributos do solo <i>versus</i> atributos do solo.....	89
4.3.1.2	Regressão linear simples entre os atributos.....	93
4.3.1.2.1	Cultivo mínimo.....	93
4.3.1.2.2	Plantio direto.....	97
4.3.2	Comparações entre tratamentos.....	97
4.4	Análise geoestatística dos atributos estudados.....	100
4.4.1	Análise semivariográfica simples.....	100
4.4.1.1	Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos.....	100
4.4.1.1.1	Cultivo mínimo.....	100
4.4.1.1.2	Plantio direto.....	107
4.4.1.1.3	Comparações entre tratamentos.....	114
4.4.1.2	Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados dos atributos.....	114
4.4.1.2.1	Cultivo mínimo.....	114
4.4.1.2.2	Plantio direto.....	118
4.4.1.2.3	Comparações entre tratamentos.....	118
4.4.1.3	Mapas de krigagem dos atributos estudados.....	118
4.4.1.3.1	Cultivo mínimo.....	118
4.4.1.3.2	Plantio direto.....	125
4.4.2	Análise semigráfica cruzada.....	125

4.4.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co- krigagem dos atributos.....	125
4.4.2.1.1 Cultivo mínimo.....	125
4.4.2.1.2 Plantio direto.....	129
5 CONCLUSÕES.....	136
6 REFERÊNCIAS.....	138
7 APÊNDICE.....	166

1 INTRODUÇÃO

O aumento de produtividade e a maior rentabilidade agrícola dependem especificamente da manutenção da capacidade produtiva dos solos, que possuem uma propriedade intrínseca que é a heterogeneidade. Assim, numa paisagem natural, os solos apresentam ampla variação morfológica, física, química e mineralógica, resultante da superposição dos efeitos variáveis do material de origem, clima, relevo, processos físicos e químicos e da atividade biológica. No caso de uma paisagem cultivada, existem fontes adicionais de heterogeneidade no solo devidas ao manejo exercido pelo homem nas suas mais variadas formas. Assim, associações de uma ou mais práticas agrícolas, tais como a calagem, rotação de culturas, adubação verde, cultivo mínimo e o plantio direto objetivam proporcionar melhorias nas condições destes atributos, e também aumento ou diminuição desta heterogeneidade, com modificações nos teores dos nutrientes, estrutura, porosidade, agregação e densidade do solo, bem como na infiltração e disponibilidade de água, com vistas a proporcionar o adequado crescimento radicular da cultura, tentando por meio dessas práticas de manejo, diminuir o estado de compactação dos solos. O termo compactação refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução do seu volume, resultante da expulsão de ar dos poros do solo e prejudicando dessa maneira a realização do ciclo fisiológico das plantas. Camadas compactadas de subsuperfície são mais prejudiciais ao desenvolvimento radicular das plantas do que perfis homogêneos com elevados valores de resistência mecânica à penetração. Existem ainda outros fatores inter-relacionados que influem no crescimento radicular, como a continuidade dos poros, fertilidade, presença de microorganismos patogênicos ou simbióticos, oxigenação e quantidade de água disponível no solo. Com o intenso cultivo utilizado na agricultura, a compactação do solo vem surgindo sistematicamente no Cerrado Brasileiro, onde nos sistemas convencionais de preparo do solo há a excessiva pulverização da camada arável, causando a formação de crostas superficiais sobre o horizonte Ap, assim como camadas coesas e compactadas.

Quando a compactação começa a limitar o desenvolvimento vegetal é necessário que medidas corretivas sejam adotadas, com o objetivo de romper a camada compactada, o que melhorará em curto ou em longo prazo as condições nas quais as plantas estão se desenvolvendo. Algumas medidas tomadas para o preparo do solo podem atenuar a sua compactação, dentre elas a aração e a gradagem profundas, a subsolagem e a rotação de culturas incluindo, se possível, plantas descompactadoras do solo. Na prática, têm sido adotados o sistema plantio direto, o cultivo mínimo, a rotação de culturas, a sucessão de culturas e a adubação verde, como formas de resgatar a auto-sustentabilidade da exploração agrícola e, por conseguinte, a preservação do meio ambiente. Por outro lado, como no sistema convencional o perfil de compactação do solo é distinto daquele do plantio direto, tal fato faz com que o agricultor seja obrigado a movimentá-lo pela aração e/ou gradagem.

Assim, nas dependências da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da FE/UNESP/Campus de Ilha Solteira, durante o ano agrícola 2006/2007, tendo a cultura do feijoeiro estabelecida nos sistemas de elevado nível tecnológico, dados pelo cultivo mínimo e plantio direto, o presente trabalho objetivou, diante dos atributos do solo trabalhado, o seguinte: a) analisar, entre os dois sistemas de manejo empregados, a diferença de produtividade de grãos do feijoeiro, embasada nas diferenças existentes entre os valores médios dos atributos do solo trabalhado, e b) definir o atributo do solo, para ambos os sistemas de manejo, que melhor se apresente para explicar a variabilidade da produtividade de grãos do feijoeiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijoeiro

O feijão é um componente fundamental na alimentação básica da população brasileira, como importante fonte de proteínas e ferro. Na safra 2006/07, sua produção nacional chegou a 3,339 milhões de toneladas, numa área de aproximadamente 4,087 milhões de hectares, com produtividade média de 817 kg ha⁻¹ (CONAB, 2008).

A cultura do feijoeiro no Brasil vem passando por profundas mudanças nos últimos anos. Até bem pouco tempo caracterizava-se por cultivos em pequenas áreas, com pouca utilização de tecnologia, voltada para a subsistência e apostando na instabilidade do mercado. Trata-se de um alimento bastante consumido pela população mundial, principalmente pelo brasileiro, sendo a sua principal fonte de proteína vegetal. Seu teor protéico pode atingir 33%, com valor energético de 341 cal 100g⁻¹ (POMPEU, 1987).

Por não apresentar sensibilidade ao fotoperiodismo, o feijoeiro pode ser cultivado em qualquer época do ano, desde que não ocorram limitações de temperatura e/ou água (MAEDA; MENDONÇA, 1990). No Brasil cultiva-se essa leguminosa em três épocas: o *feijão das águas* na região sul e sudeste, o *feijão da seca* e o *feijão de inverno*, sendo esses dois cultivados em todo Brasil. O último responde por 10% da produção nacional, ocupando 260 mil hectares. A produtividade média de cada época é bastante variável, sendo de 700 kg ha⁻¹ de grãos na primeira, 400 kg ha⁻¹ na segunda e podendo atingir 2800 kg ha⁻¹ na terceira (BANNO, 1994). O feijoeiro é uma planta da família Fabaceae, apresentando um ciclo de 90-100 dias e sistema radicular superficial. Apesar da capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, pela simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, sua inoculação não tem proporcionado resultados satisfatórios e compatíveis com elevada produtividade (BUZETTI et al., 1992). Em decorrência tanto do curto ciclo, como das características próprias do sistema radicular, o feijoeiro é considerado uma planta exigente em nutrientes, devendo-se colocá-los adequadamente, no tempo e no espaço, à sua disposição. Por outro lado, a avaliação dos atributos físicos do solo para a cultura do feijoeiro, tais como a densidade global e a resistência à penetração, pode substancialmente auxiliar na determinação do grau de

compactação, estabelecida no perfil do solo, e do conseqüente efeito sobre seu desenvolvimento radicular (SCHUMACHER; SMUCKER, 1981, WUTKE et al., 2000).

A cultura do feijoeiro, constituindo-se num produto agrícola de alto risco de produção e de mercado, é taxada como a segunda de maior risco de preço no Estado de São Paulo. Por possuir elevados níveis de flutuação da produtividade e dos preços acessíveis ao produtor, como também devido a fatores sociais e culturais, a adoção de inovações tecnológicas para seu cultivo tem sido pouco utilizada pelos produtores. Devido ao caráter de subsistência em algumas regiões, assim como de lavoura comercial em outras, todos eles tipicamente em pequenas propriedades, seu cultivo é efetuado por uma grande diversidade de técnicas de sistemas de manejo (TSUNECHIRO; FERREIRA, 1994). A adoção de um manejo cultural adequado é importante para aumentar a eficiência da planta na utilização dos recursos disponíveis, evidenciando a possibilidade de aumentar sua produtividade. Entre algumas dessas técnicas são citadas a adubação, a fertirrigação, e os fatores que melhoram o desenvolvimento do sistema radicular (preparo do solo) (SORATTO, 2002).

2.2 Solo agrícola ideal

2.2.1 Densidade do solo

A resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação deste, e muitos trabalhos têm buscado valores que causem restrições ao crescimento das raízes das plantas e diminuição da produtividade. A dificuldade está em isolar o efeito desses atributos físicos e da umidade do solo; portanto, dúvidas persistem sobre o atributo que melhor caracterize o estado de compactação e que seja sensível às variações de manejo do solo (SILVA, 2003).

A densidade do solo, também conhecida como densidade aparente ou densidade global, por definição, é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca em estufa, a 110°C, e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e os poros, dada em g cm^{-3} , kg dm^{-3} , t m^{-3} ou Mg m^{-3} . Ela possui estreita relação com outros atributos do solo, tais como a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica e a resistência à penetração, os quais são de suma importância para o desenvolvimento da planta (KIEHL, 1979; CAMARGO; ALLEONI, 1997; CARVALHO et al., 1999; FOLONI et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; SECCO et al., 2005; MELLO FILHO et al., 2006; MENDES et al., 2006).

A densidade do solo é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, sendo muito utilizada como indicadora de sua estrutura e dureza. Desta forma, alterações

dos seus valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade e a porosidade total (DORAN et al., 1994).

Segundo Kochhann et al. (2000), a compactação do solo é entendida como o aumento da sua densidade, resultante da complexa interação entre os processos físicos, químicos e biológicos diretamente relacionados com sua massa/volume. Já para Holtz e Kovacs (1981), é definida como sendo o adensamento dos solos pela aplicação de uma energia mecânica, variando num mesmo tipo de solo, e alterando-se, espacial e volumetricamente, conforme a variação da estrutura e da textura. Também tende a aumentar com a profundidade do perfil, sobretudo pela diminuição do teor de matéria orgânica. Desta forma, foram relatados valores gerais desse atributo variando entre 1,40 a 1,80 kg dm⁻³. Por outro lado, nos solos de textura arenosa seus valores variam de 1,20 a 1,40 kg dm⁻³, ao passo que nos de textura argilosa, entre 1,00 a 1,25 kg dm⁻³ (KIEHL, 1979; CAMARGO; ALLEONI, 1997; REICHARDT; TIMM, 2004). Em relação aos níveis críticos da densidade do solo, Bowen (1981) considerou que valores em torno de 1,55 kg dm⁻³ para solos franco-argilosos e argilosos, e de 1,85 kg dm⁻³ para solos arenosos, podem afetar o crescimento das raízes e conseqüentemente a produtividade vegetal.

A compactação do solo é resultado do processo físico exercido pela ação das forças mecânicas causadas pelo tráfego de máquinas por ocasião da semeadura, tratos culturais, colheita e transporte, do pisoteio animal em áreas de pastejo, especialmente nos solos argilosos quando úmidos. Tais forças aproximam as partículas unitárias do solo, expulsando o ar e a água do seu interior. Desta forma, ocorre a redução do seu volume total, por diminuir drasticamente a macroporosidade e aumentar levemente a microporosidade. Conseqüentemente há um aumento tanto da densidade global como da resistência à penetração, assim como uma diminuição da taxa de infiltração (HAKANSSON et al., 1988; SOANE; OUWERKERK, 1994; KOCHHANN et al., 2000).

O efeito da compactação sobre a planta inicia-se com a restrição ao crescimento radicular, o que implica em conseqüências para o desenvolvimento da parte aérea e sua respectiva produtividade. O sistema radicular talvez seja o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação do solo, mesmo quimicamente corrigido. Contudo, estando compactado, as plantas nele estabelecidas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, devido ao deficiente desenvolvimento das novas raízes, uma vez que é nelas que ocorre a maior taxa de absorção (REICHERT et al., 2007). Desta forma, Collares (2005) observou que o crescimento radicular do feijão foi menos vigoroso, quando o solo trabalhado (Latossolo Vermelho com 607 g kg⁻¹ de argila) foi submetido à compactação proporcionada

por quatro passadas de um trator de 16,6 t. Também foi observada maior concentração das raízes na sua camada superficial (0-0,10 m).

Trabalhos envolvendo a densidade do solo evidenciaram grande importância deste atributo para os estudos agronômicos, assim como uma estreita relação com outros, permitindo avaliar que com o seu aumento ocorre a diminuição da macroporosidade, condutividade hidráulica, difusividade do ar, absorção iônica, e conseqüentemente o aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo, o que poderia contribuir para a diminuição da produtividade agrícola (CARVALHO et al., 1999; FOLONI et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; SECCO et al., 2005; MELLO FILHO et al., 2006; MENDES et al., 2006; MEGDA et al., 2008).

2.2.2 Densidade da partícula sólida

A densidade da partícula sólida do solo, também conhecida apenas como densidade da partícula, pode ser considerada como sendo a razão entre a massa de uma amostra deformada de solo, seca a 110 °C, e o seu volume de sólidos, sem considerar a parte porosa, normalmente dada em g cm^{-3} , kg dm^{-3} , t m^{-3} ou Mg m^{-3} (ROBINSON, 1960; KIEHL, 1979; BLAKE; HARTGE, 1986; CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Num primeiro momento, a densidade da partícula parece ser um atributo de menor importância para os estudos agronômicos. Porém, de acordo com Kiehl (1979), a relação entre a densidade da partícula com as plantas é considerada de forma indireta. Isto porque este atributo está diretamente ligado à presença de certas quantidades de diferentes componentes minerais e/ou orgânicos que acabam por influenciar diretamente o comportamento das plantas. De acordo com Forsythe (1985), o conhecimento da densidade da partícula tem grande importância para os cálculos da porosidade total, uma vez que sua expressão pode ser dada por:

$$PTc = [1-(DS/DP)] \dots \dots \dots (1)$$

onde: **PTc** é a porosidade total calculada do solo [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$]; **DS** e **DP** são respectivamente a densidade global do solo e a densidade da partícula do solo [kg dm^{-3}].

Os valores da densidade da partícula dependem da quantidade e da constituição da parte mineral e da parte orgânica, variando pouco para um mesmo solo, e não variando em grande escala em diferentes deles. Seu valor tende a se aproximar do da sua rocha de origem. O valor médio para a grande variedade de solos está em torno de 2,65-2,70 kg dm^{-3} , isto porque essa faixa é da ordem de grandeza da densidade do quartzo e da maioria dos silicatos

que ocorrem nos solos (ROBINSON, 1960; KIEHL, 1979; BLAKE; HARTGE, 1986; RAIJ, 1991; REICHARDT; TIMM, 2004).

A densidade da partícula possibilita ao pesquisador formular uma idéia sobre a predominância dos elementos orgânicos e inorgânicos presentes no solo. Nos solos derivados de rochas básicas, que contêm minerais pesados, tal como o Latossolo Vermelho Eutroférico e/ou Distroférico, a densidade da partícula pode chegar ao máximo de $3,16 \text{ kg dm}^{-3}$. Por outro lado, solos com grandes teores de matéria orgânica apresentam os menores, da ordem de $1,90 \text{ kg dm}^{-3}$, assim como, na matéria orgânica humificada pura, a cifra de $0,60\text{-}1,00 \text{ kg dm}^{-3}$ (KIEHL, 1979, 1985; RAIJ, 1991).

2.2.3 Porosidade total

Sendo o solo, do ponto de vista físico-químico coloidal, um sistema trifásico disperso, a caracterização de sua porosidade total é de grande importância para a adoção do manejo adequado. Isso porque, este sistema está estreitamente ligado à dinâmica do armazenamento e de movimentação de água, assim como à circulação de ar no seu interior, essenciais aos processos bioquímicos das plantas, sobretudo àqueles relacionados com a produtividade vegetal. O processo de aeração do solo permite a troca do seu ar com a atmosfera, evitando a deficiência de oxigênio necessária à respiração celular, assim como a síntese de compostos orgânicos pelas plantas, excluindo as possibilidades de competição entre os microorganismos e as raízes, de forma a impedir o aparecimento de doenças. Por outro lado, a água do solo é o principal componente do protoplasma vegetal, sendo obrigatória nas reações do metabolismo, além de atuar especificamente como meio de transporte de nutrientes na planta e entre o sistema solo-planta (ROBINSON, 1960; KIEHL, 1979; HILLEL, 1982; RESENDE et al., 1988; TAIZ; ZEIGER, 2004; EPSTEIN; BLOON, 2006). Ainda, de acordo com Mercante et al. (2003) e Secco et al. (2005), a porosidade total tem apresentado grande relação com a compactação e a resistência à penetração do solo, uma vez que a diminuição do diâmetro dos poros é muito evidenciada quando há aumento da compactação.

Em relação ao solo agrícola ideal, sua porosidade total, definida como sendo a porção do volume do solo não ocupada pelas partículas sólidas, dada em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, é considerada ideal quando apresentar metade do seu volume, ou seja, $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Dela fazem parte a microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, variando entre $0,250$ e $0,330 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a macroporosidade, representada pelo volume de poros responsáveis pela aeração das raízes, variando de $0,170$ a $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por outro lado, valores de macroporosidade inferiores a $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem interferir no desenvolvimento das raízes a ponto de reduzir substancialmente a produtividade agrícola, já para a cultura do feijoeiro

valores inferiores a $0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLER; SIEMER, 1968; BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979; PREVEDELLO, 1996; SILVA et al., 2002; NOVAIS; MELLO, 2007; REICHERT et al., 2007).

Wesseling e Van Wijk (1957) compararam os dados de diversos estudos e encontraram que a difusão no solo, principal mecanismo da sua aeração, deixa de se manifestar quando a macroporosidade tem um valor menor do que $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já Hodgson e MacLeod (1989) relataram súbitos aumentos no fluxo difusivo do oxigênio num Vertissolo, quando sua macroporosidade superou $0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Contudo, Robinson (1964) observou, em um Latossolo húmico, que valores menores do que $0,110 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ desse atributo foram limitantes para o crescimento da cana-de-açúcar, assim como, Forsythe e Legarda (1973), que os valores menores do que $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foram limitantes para a produtividade do feijão.

Quando o solo é compactado ocorre o aumento e a diminuição, respectivamente da resistência à penetração e da porosidade total, devendo-se esse fenômeno exclusivamente à redução dos poros maiores. Com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados, enquanto que a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Conseqüentemente, o escoamento superficial de água pode aumentar, e o crescimento vegetal ser reduzido, em virtude da diminuição da disponibilidade de água, da aeração deficiente e, portanto da restrição ao crescimento das raízes. Por outro lado, a compactação pode aumentar a tração e, conseqüentemente, diminuir a eficiência das máquinas que tráfegarão na área. Esse efeito benéfico, embora de grande relevância, é um assunto pouco abordado na literatura, uma vez que o efeito da compactação sobre a qualidade do solo e a produtividade das culturas constitui-se no interesse principal (REICHART et al., 2007).

A porosidade total do solo geralmente diminui em profundidade, havendo casos de faixas intermediárias compactadas nas quais ocorrem baixos valores desse atributo. Na prática, ela tende a ser menor nos solos arenosos ($0,350\text{-}0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) do que nos argilosos ($0,400\text{-}0,600 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Contudo, dependendo da granulometria, o solo pode ter uma porosidade total mínima de $0,300 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e máxima de $0,800 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (ROBINSON, 1960; BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979; RESENDE et al., 2002; REICHARDT; TIMM, 2004). De acordo com Raij (1981), os solos arenosos geralmente são bem arejados e com drenagem rápida, o que lhes confere uma baixa capacidade de retenção de água. Em contrapartida, os argilosos apresentam elevada capacidade de retenção de água, resultante dos maiores valores da microporosidade e da porosidade total. Contudo, nalgumas vezes podem apresentar problemas de aeração decorrentes dos baixos valores de macroporosidade.

2.2.4 Resistência mecânica à penetração e umidade

A resistência mecânica à penetração é um dos atributos físicos mais adotados como indicador da compactação do solo. Apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (FREDDI et al., 2006). Fisicamente estabelecida pela pressão, ela é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitantemente à da umidade do solo, uma vez que elas variam de forma inversamente proporcional. Contudo, varia positivamente com a densidade do solo (ORLANDO et al., 1998; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; SOUZA et al., 2006).

A resistência mecânica à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido, apresentando, na maioria das vezes, apreciável correlação com a macroporosidade e a densidade do solo. Ela é mais afetada pela variação da umidade do solo no momento da amostragem do que pela sua densidade. Por esta razão, muitos trabalhos, que objetivaram caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e sobre a produtividade das culturas, utilizaram a densidade do solo como parâmetro auxiliar à referida resistência (TORRES; SARAIVA, 1999).

De acordo com GENRO JUNIOR et al. (2004), a resistência à penetração geralmente é aumentada com a compactação do solo devido ao concomitante incremento da densidade, assim como com o decréscimo da umidade. Seu aumento é indesejável para o crescimento das plantas por causar redução do crescimento radicular. Segundo Libardi et al. (1996) e Gonçalves et al. (1999), a umidade varia de modo espacial e temporal no solo. Desta forma, pesquisas da resistência mecânica à penetração e da umidade do solo tem mostrado influência positiva sobre a produtividade vegetal (SOUZA; ALVES, 2003; FREDDI et al., 2006; SOUZA et al., 2006).

Os níveis críticos de resistência mecânica para o crescimento radicular das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Assim, conforme revisão efetuada por Reichert et al. (2007), recomenda-se sua avaliação quando o teor de água do solo estiver próximo do valor da capacidade de campo. Entretanto, quando obtida no momento em que a umidade do solo estiver ao redor de 2/3 da microporosidade (solo friável/macio) (ROSA FILHO, 2008), a maioria dos trabalhos tem adotado a seguinte classificação de resistência à penetração (RP), estabelecida por ARSHAD et al. (1996): a) extremamente baixa: $RP < 0,01$ MPa; b) muito baixa: $0,01 \leq RP < 0,1$ MPa; c) baixa: $0,1 \leq RP < 1,0$ MPa; d) moderada: $1,0 \leq$

RP < 2,0 MPa; e) alta: $2,0 \leq \text{RP} < 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 \leq \text{RP} < 8,0$ MPa e g) extremamente alta: $\text{RP} > 8,0$ MPa.

2.2.5 Matéria orgânica

A recuperação e a manutenção dos teores de matéria orgânica do solo, com as devidas repercussões sobre sua capacidade produtiva, podem ser alcançadas pela utilização de pastagens. Também, pelo uso de sistemas agrícolas intensivos, que preconizam o mínimo e/ou nenhum revolvimento, assim como, por sistemas de preparo que exigem a presença de elevadas quantidades de resteva da cultura antecedente (BAYER; MIELNICZUK, 1999).

A matéria orgânica do solo engloba os resíduos vegetais em diversos estágios de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável denominada húmus (CAMARGO et al., 1999). Possui uma superfície específica variando entre 800 e 900 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (MEURER et al., 2006), assim como, uma capacidade de troca catiônica que pode chegar a 1400 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Atualmente, com a adoção de sistemas conservacionistas de cultivo, tais como o plantio direto e o reduzido, tem-se evidenciado sobre a necessidade da resteva, que se constitui no material precursor da futura matéria orgânica humificada, assim como, sobre a importância dessa fase na ciclagem dos nutrientes, no controle da umidade e da temperatura, infiltração de água, erosão e da atividade biológica do solo (CANELLAS et al., 1999).

A acidez potencial corresponde às substâncias ou aos compostos que liberam H^+ para a solução do solo, causando sua acidificação. Estas incluem o Al^{3+} trocável adsorvido às cargas negativas das argilas e dos grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica (BISSANI et al., 2004). A acidificação do solo pode levar a uma perda significativa da produtividade das culturas (FAGERIA; SANTOS, 2000).

Considerando que um mesmo sistema de cultivo do solo afeta de forma semelhante os regimes de temperatura e umidade, bem como o fracionamento e a incorporação dos resíduos vegetais nos solos, o efeito diferenciado desses sistemas sobre a taxa de decomposição deve-se provavelmente aos aspectos relacionados às diferentes capacidades protetoras da matéria orgânica à ação decompositora dos microrganismos. Nos Latossolos, além da mais alta proteção física da matéria orgânica pela maior capacidade de formação de agregados, a matéria orgânica encontra-se, em grande parte, associada às superfícies minerais dos óxidos de Fe, pouco afetadas pelo preparo do solo devido a elevada estabilidade química que possuem (OAEDES et al., 1989).

A matéria orgânica afeta as características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre as características químicas, destacam-se principalmente a disponibilidade de nutrientes às culturas, a capacidade de troca de cátions e a complexação de elementos tóxicos e

micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos. Já a principal característica física modificada é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais características físicas do solo, como sua densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e a infiltração de água, que são fundamentais à sua capacidade produtiva. No tocante às características biológicas, a matéria orgânica as afeta diretamente, uma vez que atua como fonte de carbono, energia e nutrientes aos microrganismos (CAMARGO et al., 1999; BAYER; MIELNICZUK, 2008). Os níveis críticos estabelecidos por Raij et al. (1997), para a matéria orgânica do solo (MO), foram: a) baixo: $MO < 25,0 \text{ g dm}^{-3}$; b) médio: $25,1 \leq MO \leq 50,0 \text{ g dm}^{-3}$; c) alto: $MO > 50,0 \text{ g dm}^{-3}$.

Nos solos tropicais altamente intemperizados, a mineralogia oxídica da fração argila representa um importante componente à estabilização da matéria orgânica que, por sua vez, juntamente com as argilas, contribui substancialmente para melhorar a sua agregação e sua estrutura. O incremento e a manutenção da matéria orgânica nos trópicos, sobretudo no cerrado, tem-se mostrado mais difícil do que na região subtropical sul brasileira. A adoção do sistema plantio direto tem contribuído substancialmente para essa melhoria, tanto quantitativa quanto qualitativa, da matéria orgânica do solo, resultando em melhorias às suas características físicas e químicas (SILVA; MENDONÇA, 2007).

2.2.6 Fósforo

Em relação aos três macronutrientes primários, o fósforo é aquele exigido em menores quantidades pelas plantas. Não obstante, trata-se do nutriente mais usado na adubação das culturas agrícolas brasileiras, uma vez que sua carência é generalizada nos solos tropicais, assim como por ser fortemente fixado. Assim, ao estudá-lo torna-se necessário reconhecer as interações desse nutriente neste meio, com o objetivo de compreender a dinâmica de suas formas disponíveis às plantas. Tal conhecimento é indispensável para avaliação da sua disponibilidade, assim como para orientar a prática da adubação fosfatada. O fósforo encontra-se na solução do solo como íons ortofosfato, forma derivada do ácido ortofosfórico (H_3PO_4), que após dissociação se transforma em HPO_4^{2-} nos solos alcalinos, e em $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ nos ácidos (RAIJ, 1991).

As funções do fósforo nas plantas são a respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular, crescimento das células, crescimento prematuro das raízes, qualidade de frutas, verduras, grãos e vital para formação das sementes, no qual o seu suprimento adequado, desde o início do desenvolvimento vegetal, é importante para a formação dos primórdios das partes reprodutivas, sendo que os fatores que afetam a disponibilidade de

fósforo são: a) tipo e quantidade de argila, b) pH do solo e c) teor de matéria orgânica. A forma que o fósforo se liga à matéria orgânica é similar à forma com que o fósforo é adsorvido pelos oxihidróxidos de Fe e Al. Assim, sistemas de manejo que privilegiem o aporte orgânico contínuo podem aumentar a ciclagem do P e aumentar sua disponibilidade para as plantas (ANDRADE et al., 2003). Os níveis estabelecidos por Raij et al. (1997) para o fósforo extraído por resina foi o seguinte: a) baixo: $P < 15 \text{ mg dm}^{-3}$, b) médio: $16 \leq P \leq 40 \text{ mg dm}^{-3}$ e c) alto: $P > 40 \text{ mg dm}^{-3}$.

2.2.7 Potencial hidrogeniônico

Em relação aos nutrientes vegetais, o pH do solo influencia as respectivas solubilidades, concentrações na solução e as formas iônicas. Conseqüentemente, também são influenciadas a absorção e a utilização deles. A grande maioria dos solos brasileiros apresenta sérias restrições ao desenvolvimento das culturas agrícolas, decorrentes do efeito nocivo da acidez, impondo severas restrições à produtividade agrícola (McBRIDE; BLASIAK, 1979; FAGERIA et al., 1997; SOUZA et al., 2007).

O avanço da agricultura no Brasil tem sido feito principalmente nas áreas do Cerrado, cujos solos têm boas propriedades físicas e topografia favorável à mecanização. Entretanto, apresentam propriedades químicas inadequadas, como elevada acidez e deficiência generalizada de nutrientes, com destaque para o P, Ca e Mg. Solos dessa natureza, quando corrigidos quimicamente, apresentam grande potencial para uma agricultura tecnificada e de elevada produtividade. O conhecimento da relação entre a acidez do solo e o crescimento e desenvolvimento das plantas é fundamental para o estabelecimento das práticas corretivas dessa acidez, que visem à maior eficiência, tanto dos sistemas de produção agrícola como do uso dos recursos naturais (SOUZA et al., 2007).

Ainda, o pH influencia a atividade de microrganismos do solo que estão ligados com a mineralização da matéria orgânica, nitrificação, fixação biológica de nitrogênio e infecção do sistema radicular com micorrizas, que aumentam a disponibilidade de nutrientes. É portanto, uma das propriedades químicas do solo mais importantes para a determinação da produção agrícola (FAGERIA; SANTOS, 2000).

Fageria (2001b) obteve a produtividade máxima de feijão com o pH de 6,2 em solo do cerrado. Já o pH ideal para as culturas de soja, feijão, milho e trigo está em torno de 6,0 (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1998) e o pH médio do solo de cerrado está em torno de 5,0 (LOPES, 1983). Para o pH em CaCl_2 adotam-se os seguintes limites de interpretação de classes segundo RAIJ (1991): a) muito alta: até 4,3, b) alta: 4,4 – 5,0, c) média: 5,1 – 5,5, d) baixa: 5,6 – 6,0 e e) muito baixa: $> 6,0$.

2.3 Sistemas de preparo do solo para a cultura do feijoeiro

A mecanização agrícola é um importante componente básico na maioria das estratégias de desenvolvimento rural e no aumento da produtividade da mão-de-obra. No entanto, sua introdução, sem qualquer adaptação prévia aos diferentes tipos de solo, pode ocasionar rápida e contínua degradação desse recurso natural (SIQUEIRA, 2002).

Os sistemas de preparo de solo para o estabelecimento da cultura do feijoeiro utilizados no Brasil são o cultivo mínimo (preparo reduzido), plantio direto e o convencional. Nos dias atuais, o sistema mais utilizado ainda é o convencional, que consiste no revolvimento de camadas superficiais objetivando incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e com isso aumentar a permeabilidade e o armazenamento de água, facilitando o crescimento das raízes das plantas (BRAUNAK; DEXTER, 1989). Revolvendo-se o solo, altera-se a agregação, principalmente das argilas, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, facilitando seu arraste pela ação da chuva e do vento, causando erosão (WÜSRCHE; DENARDIN, 1980). Diante do aumento da fronteira agrícola nacional, caracterizada pelo cultivo dos solos do Cerrado Brasileiro, o preparo convencional vem perdendo área de cultivo, em benefício do sistema plantio direto, caracterizado por apresentar as menores taxas de erosão do solo, pois a manutenção da cobertura morta é importante, protegendo o solo contra os agentes erosivos (DERPSCH, 1985; CALEGARI, 1993).

Os sistemas de preparo do solo promovem modificações das propriedades físicas como a agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), a densidade e a porosidade do solo (DE MARIA et al., 1999). A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (DIAS JR.; PIERCE, 1996). Deste modo, a escolha de um sistema de preparo do solo deve levar em consideração as respostas ao aumento das produtividades das culturas que, sobretudo, visem à diminuição das perdas por erosão, proporcionem o controle das plantas daninhas, aumentem a capacidade de retenção e a movimentação de água e recuperem suas propriedades físicas, químicas e biológicas (HENKLAIN, 1997). Furlani e Gamero (2001) relataram que a escolha de um sistema de cultivo é extremamente complexa, mudando drasticamente com a região, tipo de solo e condições climáticas, entre outras. Assim, a seleção de um método de preparo do solo e de um sistema de cobertura no período do inverno são muito importantes no auxílio da conservação do solo. Neste sentido, Siqueira (1999) relatou que a principal exigência para o bom desenvolvimento de uma cultura é a existência de um solo com ótimas condições físicas, ou seja, com boa estruturação. Esta condição, quando

obtida, fornece uma distribuição adequada da porosidade, otimizando a disponibilidade de água e as trocas gasosas às plantas.

O uso inadequado de equipamentos de preparo do solo e as severas práticas de manejo adotadas pelos agricultores são os principais fatores da sua degradação. Dependendo do grau de alteração das propriedades físicas, podem ser produzidas condições de extrema limitação ao desenvolvimento das culturas e, conseqüentemente, implicar no decréscimo da produtividade agrícola. Formas alternativas de manejo do solo, que empregam uma mínima mobilização, ou a sua ausência total, que mantêm quantidades consideráveis de resíduos vegetais na superfície e que favorecem a sua conservação, vêm se destacando no Brasil (SILVA, 2000).

2.3.1 Preparo convencional do solo

Entende-se como preparo do solo, o conjunto de operações realizadas antes da sementeira, para revolver o solo, expondo-o ao ar, ao sol e à ação das máquinas, além de incorporar fertilizantes, corretivos e restos de culturas anteriores, e enterrar a cobertura vegetal como forma de controlar as plantas daninhas (FOLLE; SEIXAS, 1986).

Em algumas regiões do Brasil, são adotadas variações do método convencional de preparo do solo, o qual é feito mediante o uso da grade pesada, associada com uma ou duas gradagens leves. O uso dessa prática por anos sucessivos, além de ocasionar excessiva desagregação física do solo, com o preparo de uma camada muito superficial (0,12 a 0,15 m), pode levar à formação de uma camada pouco permeável abaixo da sua superfície, conhecida como “sola-de-grade” ou “pé-de-grade” (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 1993). Os resultados do uso impróprio de equipamentos para o preparo do solo vêm sendo observados, especialmente nas últimas décadas, traduzindo-se em diminuição da eficiência dos insumos aplicados, na degradação do solo, e na erosão, tendo como resultante a degradação das propriedades físicas e químicas do solo (FERNANDES et al., 1983), a aceleração da decomposição da matéria orgânica (KUIPERS, 1991), a redução da condutividade hidráulica, enchentes, assoreamento e poluição dos cursos d'água, bem como na redução da produtividade das culturas agrícolas.

2.3.2 Sistema cultivo mínimo

No cultivo mínimo (escarificação mais sementeira), a mobilização do solo é menor, quando comparado ao sistema convencional. Neste sistema, efetua-se um preparo reduzido do solo, até aproximadamente 60 dias antes da sementeira da cultura, para promover a germinação das sementes de plantas daninhas e voluntárias, bem como, reduzir as irregularidades da superfície do solo provocadas pelas colhedoras. Dallmeyer (1994) afirmou

que o preparo reduzido do solo, por possibilitar baixa inversão da leiva de movimentação, menor número de operações e baixa incorporação dos resíduos vegetais, apresenta vantagens em relação aos sistemas tradicionais de mobilização, em função do menor custo de preparo e da redução das perdas de solo e água. Por outro lado, Moraes (1984) afirmou que a redução da erosão é conseguida pela existência dos resíduos culturais sobre a superfície do solo, assim como pelo aumento da rugosidade superficial e da porosidade, melhorando, dessa forma, a infiltração de água no seu perfil. O cultivo mínimo, designação também feita ao preparo reduzido, consiste no mínimo revolvimento do solo e na manutenção dos resíduos vegetais, em maior quantidade possível na sua superfície. Ele implica na diminuição das operações de manejo. Esse sistema já está bastante difundido no país, sendo realizado pelo uso de escarificadores, normalmente equipados com discos de corte na dianteira de cada haste para operações nas quais haja resteva na superfície. Também acompanha o equipamento um rolo destorroador que tem por função diminuir o tamanho dos torrões e nivelar o solo para a semeadura, de forma conjugada, realizando mais de uma operação de preparo a cada vez que esse implemento é utilizado (FURLANI, 2000).

2.3.3 Sistema plantio direto

O plantio direto é um sistema de manejo do solo onde os restos vegetais são deixados na superfície do solo. O solo é revolvido apenas no sulco onde são depositadas sementes e fertilizantes. As plantas daninhas são controladas por herbicidas. O sistema plantio direto tem como principal característica o revolvimento do solo exclusivamente na linha de semeadura, mantendo os resíduos vegetais na superfície. Conseqüentemente, são minimizados os efeitos erosivos das chuvas intensas que ocorrem nos climas tropicais (MUZILLI, 1985; BARIZON, 2001). Comparado a outros métodos de cultivo, ele se sobressai por apresentar uma elevada atenuação da energia de impacto das gotas de chuva com solo, pelo amortecimento que sua camada de cobertura morta proporciona contra a manifestação da erosão (DERPSCH et al., 1991). No plantio direto, a camada de maior impedimento ao crescimento radicular está localizada entre 8 e 15 cm (SILVA, 2003), formando o chamado *pé-de-plantio direto* (REICHERT et al., 2007).

Hill e Cruse (1985) desenvolveram um trabalho em duas áreas experimentais, durante dois e oito anos contínuos. A resistência do solo à penetração das raízes foi avaliada com a cultura do milho nos sistemas de cultivo mínimo, plantio direto e preparo convencional. Os autores verificaram que todos os sistemas de manejo apresentaram efeitos significativos de resistência à penetração na área com oito anos de trabalho. Em ambas as áreas experimentais,

os sistemas de cultivo mínimo e plantio direto apresentaram maior resistência do solo à penetração, quando comparados com o sistema convencional.

Culley et al. (1987) observaram que no plantio direto o tráfego das máquinas, associado apenas à semeadura e à aplicação de herbicidas, eliminou os benefícios da baixa resistência à penetração e a capacidade de infiltração. A resistência do solo à penetração foi um indicador mais sensível dos efeitos do tráfego do que a densidade do solo.

Hermawan e Cameron (1993) estudaram o efeito do preparo convencional e do cultivo mínimo sobre a resistência do solo à penetração em um solo argiloso. Os resultados mostraram que o sistema de preparo convencional propiciou maior resistência do solo à penetração, quando comparado com os resultados obtidos no cultivo mínimo. Já Cassel (1982) constatou que o preparo do solo com escarificador resultou numa menor resistência à penetração nas entrelinhas e na faixa destinada ao tráfego do trator, com relação ao preparo convencional. Sete meses após o preparo, nas entrelinhas sem tráfego, a vantagem do preparo com escarificador ainda persistia na camada de 0- 0,40 m de profundidade. Assim, os efeitos causados pelo preparo do solo, permitem aceitar, como hipótese central, que as peculiaridades de sistemas de manejo do solo contrastantes como a escarificação e o plantio direto devem causar diferentes variabilidades no solo, exigindo cada um deles um tratamento específico quando ao planejamento e a avaliação experimental. É possível que, após algum tempo de manejo em uma área, os efeitos continuados da ação antrópica possam suplantar a variabilidade subjacente e espacialmente estruturada do solo ao natural, levando-a a uma distribuição aleatória e, assim, o procedimento estatístico clássico poderia ser usado sem qualquer restrição.

2.4 A geoestatística na pesquisa agrônômica

Matheron (1962), em sua forma atual, definiu a geoestatística como a aplicação do formalismo das funções aleatórias ao reconhecimento e estimação de fenômenos naturais, o que conduz a vários tipos de aplicações. Os conceitos de variável aleatória, variável regionalizada, funções aleatórias e estacionaridade são fundamentais para a geoestatística.

Avanços tecnológicos na agropecuária têm mostrado a importância de se medir a variação espacial e temporal de propriedades que afetam a produtividade das culturas, com o objetivo de otimizar o aproveitamento de recursos e diminuir custos. O gerenciamento do processo de produção em função da variabilidade é o que se convencionou chamar Agricultura de Precisão. Seu objetivo é correlacionar causas e efeitos a partir de séries históricas de dados e de sua distribuição espacial (CARVALHO et al., 2002a). Cientistas da área de solos se preocupam com o problema de variação espacial e temporal dos solos desde o

começo do século passado. Somente nas décadas de 50 e 60, com a formalização da teoria de estatística espacial, é que os cientistas começaram a perceber a potencialidade deste instrumento para o manuseio de dados quantitativos, facilitando a compreensão da variabilidade do solo (BURROUGH et al., 1994).

As mais variadas interações entre os atributos do solo fazem com que a variabilidade espacial, horizontal e/ou vertical, seja algo inquestionável. Assim, quando uma determinada propriedade do solo varia de um local para outro, obedecendo algum grau de organização, expressa pela dependência espacial, sai de cena a estatística clássica, que supões que as amostras aleatórias são independentes entre si, passando tal condição a ser priorizada como objeto de estudo da geoestatística (UGOLINI; EDMONDS, 1983; TRANGMAR et al., 1985; PONTES, 2002), que é a ferramenta básica para o uso da agricultura de precisão.

A agricultura de precisão é representada por toda tentativa de desenvolvimento econômico do meio rural, apoiada no ótimo da eficiência gerencial que determinadas áreas agrícolas necessitam, de forma localizada no espaço. Assim, a partir do mapeamento das correlações existentes, diretas e/ou indiretas, entre os atributos do solo e a produtividade das culturas, pode-se efetuar a aplicação dos insumos em taxas variadas. Como exemplo, nas áreas de menores produtividades agrícolas, normalmente associadas aos baixos níveis de fertilidade do solo, seriam destinadas as maiores taxas de fertilizantes, sendo perfeitamente válido o inverso deste fato. A partir do georreferenciamento, da maioria das informações necessárias, podem ser editados mapas digitais para todas elas, isolada ou conjuntamente, objetivando a aplicação final dos insumos em taxas variadas (PIERCE; NOWAK, 1999).

A geoestatística é utilizada para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, auxiliando na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados (BURGESS; WEBSTER, 1980). Seu uso requer, conforme Vieira et al. (1981), a coleta de amostras previamente planejadas, com a localização espacial exata de cada ponto amostral. Trangmar et al. (1985) e Corá (1997) relataram a influência dos atributos do solo sobre o padrão e a distribuição espacial da produtividade da planta. Conforme Salviano et al. (1998), a planta responde, sobretudo quando sua produtividade é analisada espacialmente, de forma positiva e/ou negativa conforme o comportamento da variabilidade dos atributos do solo. Dessa forma, Miller et al. (1988) afirmaram que o comportamento da produtividade vegetal acompanha a distribuição e a variação espacial dos nutrientes do solo. Gaston et al. (2001), estudando a espacialidade da granulometria, pH e da matéria orgânica do solo, e relacionando com a distribuição de plantas daninhas, concluíram que há uma correlação

positiva entre a densidade de tais plantas e as áreas mapeadas com alto teor de matéria orgânica e de textura argilosa.

A variabilidade dos solos tem sido abordada pela classificação numérica, por métodos de estatística multivariada, classificação contínua (fuzzy), geoestatística, métodos de fractais, morfologia matemática e teoria do caos (BURROUGH et al., 1994). Embora estes métodos estatísticos permitam inferir sobre a variabilidade espacial do solo (vertical e horizontal), a dependência espacial entre as amostras somente pode ser modelada através da geoestatística (MULLA et al., 1992; WEBSTER, 2000). Análises estatísticas clássicas que consideram a independência entre as amostras, baseadas na média, vêm sendo associadas com análises geoestatísticas fundamentadas na teoria das variáveis regionalizadas (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), por meio do semivariograma e da dependência espacial.

A geoestatística teve suas primeiras aplicações em mineração (DAVID, 1970; JOURNAL, 1974), depois em hidrologia (DELHOMME, 1976). Contudo, já existem vários estudos em ciência do solo (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; SOUZA et al., 1997; VIEIRA, 1997; BERG; OLIVEIRA, 2000; SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002b; SOUZA et al., 2003 a,b; MONTANARI, et al., 2005; LIMA et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2008).

A análise geoestatística de uma variável única é o método que descreve a variabilidade espacial e envolve principalmente: o semivariograma, que é a estimativa e modelagem da estrutura espacial da variância, e a krigagem que é a predição de valores da variável regionalizada em pontos ou regiões não amostrados. Variável regionalizada é aquela que mostra características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as completamente determinísticas, apresentando uma aparente continuidade no espaço. A continuidade geográfica atribuída se manifesta pela tendência que a variável tem de apresentar valores muito próximos em dois pontos vizinhos e mais diferentes à medida que esses pontos vão ficando mais distantes (VIEIRA et al., 1983).

2.4.1 Semivariograma

A estimativa da dependência espacial ou temporal entre amostras vizinhas pode ser feita pela autocorrelação, que é de grande utilidade quando se efetua a amostragem em uma direção. Quando a amostragem envolve duas direções, a ferramenta mais apropriada na estimativa da dependência entre amostras é o semivariograma. O semivariograma define o tipo e a forma da associação espacial e, segundo VIEIRA et al. (1983), constitui-se no primeiro passo da análise geoestatística. O semivariograma é uma ferramenta básica de

suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMBRAPA, 2004).

O semivariograma é um gráfico que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável (ou variáveis) sob estudo, ou seja, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, podendo ser representada analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots\dots\dots(2)$$

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. Geralmente, o semivariograma é representado pelo gráfico de $\gamma(h)$ versus h . O esquema mostrado na Figura 1 expressa o comportamento típico de um semivariograma experimental de um atributo que apresenta dependência espacial. Pontos próximos entre si são mais semelhantes do que pontos mais afastados. A função de semivariância quantifica a dissimilaridade entre os pontos, ao contrário da correlação (VIEIRA et al., 1981).

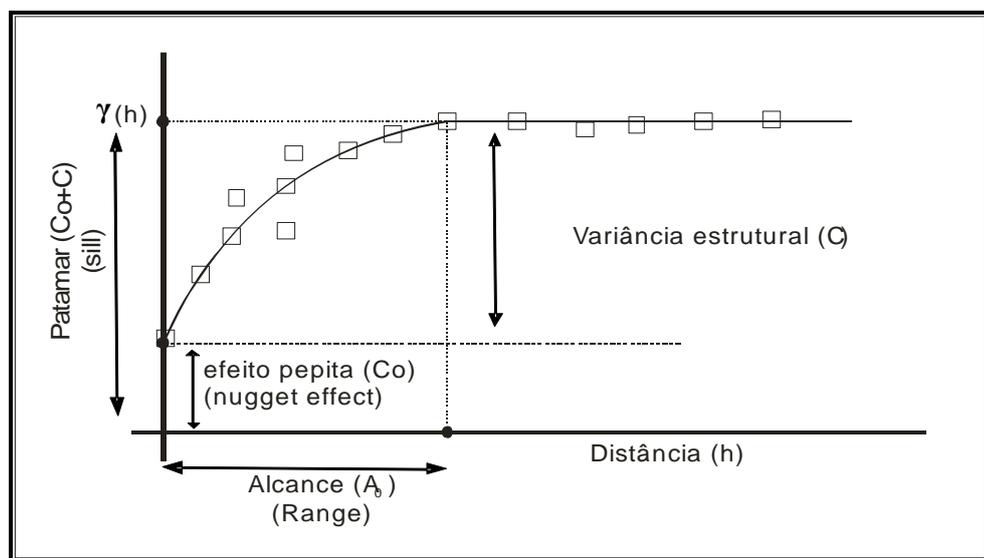


Figura 1. Exemplo de semivariograma experimental, com os parâmetros C_0 (efeito pepita), C_0+C (patamar) e A_0 alcance.

O semivariograma começa com um baixo valor, denominado **efeito pepita puro** (C_0) e cresce à medida que h cresce, até uma distância, denominada **alcance**, representada por " A_0 ", que determina a distância até a qual o atributo se apresenta espacialmente dependente. A partir desta distância, os dados podem ser considerados independentes. O **alcance** da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si. Assim, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. Contudo, passam a assumir valores independentes, maiores ou menores, somente para as distâncias estabelecidas a partir do seu valor (VIEIRA et al., 1981; MCBRATNEY e WEBSTER, 1985). Seu conhecimento é de extrema importância à Agricultura de Precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora, e assim poder efetuar a distribuição no terreno de um determinado insumo com taxas variáveis (COELHO, 2003).

No ajuste dos modelos experimentais são considerados: a) o maior coeficiente de determinação (r^2); b) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**), e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (**ADE**). O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. Para cada atributo são estimados o efeito pepita (C_0), alcance (A_0) e o patamar (C_0+C). A classificação da dependência espacial (**ADE**) é realizada conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada pelo GS⁺ (2004) conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C/(C+C_0)].100.....(3)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; $C+C_0$ é o patamar.

A interpretação proposta para o **ADE** foi a seguinte: a) $\text{ADE} \leq 25\%$ indicando variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < \text{ADE} \leq 75\%$ indicando variável espacial moderadamente dependente, e c) $\text{ADE} > 75\%$ indicando variável espacial fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuam a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da

interpolação por krigagem, os mapas de krigagem para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

Atualmente no Brasil, a pesquisa geoestatística que visa estabelecer as correlações, lineares e espaciais, entre atributos do solo com a produtividade das culturas, vem se intensificando. Dessa forma, os valores dos alcances das dependências espaciais observados para alguns atributos do solo e da planta foram entre: a) 13 e 126 m, e 8 e 18 m, respectivamente, para a resistência à penetração e a umidade gravimétrica do solo (SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002b; CORÁ et al., 2004); b) 9 e 69 m para a densidade do solo (CARVALHO et al., 2002b; SOUZA, 2004); c) 14 e 617 m para o fósforo do solo (CARVALHO et al., 2002a; FREDDI, 2003; LEÃO, 2004); d) 18 e 913 m para o pH do solo (SALVIANO et al., 1998; CARVALHO et al., 2002b; FREDDI, 2003; LEÃO, 2004); e) 16 e 53 m para a matéria orgânica do solo (SALVIANO et al., 1998; FREDDI, 2003; CORÁ et al., 2004); e finalmente f) 6 e 26 m para a produtividade de grãos de feijão (GONÇALVES et al., 1998; FREDDI et al., 2005; SANTOS et al., 2005).

2.4.2 Krigagem

Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamento geológico. Entretanto, seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos, no campo hidrológico, no atmosférico e outros correlatos (EMBRAPA, 2004).

A krigagem é um processo de interpolação que estima valores de atributos em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima, podendo expressar os resultados em forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional. O valor da variável espacial, num local não amostrado, é estimado por combinação linear de valores medidos em outros locais vizinhos, levando-se em conta a modelagem da dependência espacial da variável, expressa pelo semivariograma. Pontos próximos dos locais não amostrados têm maior peso do que os afastados e aqueles agrupados têm maior peso do que os isolados, (VIEIRA et al., 1983; BORGELT et al., 1994).

Dentre os diversos métodos de interpolação disponíveis, são referidos o do inverso da potência da distância, mínima curvatura, base radial, *shepard*, regressão polinomial, triangulação e krigagem. A krigagem apresenta, entre outras vantagens, maior precisão geral e fidelidade aos dados originais (VIEIRA, 2000). Landim (1998) afirmou ainda que a expressão do erro associado aos valores estimados distingue-o dos demais algoritmos à disposição. Este método também é descrito como geoestatístico, exigindo a construção prévia, análise e o ajuste do semivariograma. Para este fim (VIEIRA, 2000), o estimador clássico de Matheron é

o mais utilizado, apresentando-se mais estável sob normalidade, sendo recomendável à utilização de um estimador robusto em casos de dados assimétricos.

A krigagem utiliza um interpolador linear não tendencioso e de variância mínima que assegura a melhor estimativa (VIEIRA et al., 1983; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; JOURNAL e HUIJBRETS, 1991). Este estimador utiliza as informações obtidas no semivariograma para determinar pesos otimizados que são usados para a estimativa de pontos não amostrados. Assumindo que o semivariograma é uma função da distância, os pesos mudam de acordo com a distribuição espacial das amostras.

A utilização das técnicas de geoestatística em atributos de solos, na inferência de pontos não amostrados (krigagem), foi inicialmente apresentada nos trabalhos de Burgess e Webster (1980); Burgess et al. (1981); Vieira et al. (1981); Yost et al. (1982) e Braga e Druck (1993). Esses autores mostraram a boa adequação dos interpoladores geoestatísticos aos dados de solos e consideraram que a krigagem apresenta uma estrutura teórica desejável, condições favoráveis de implementação e uma estabilidade às variações amostrais.

A estimativa de valores para locais não amostrados, pela técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo para os atributos do solo, permitindo a definição de linhas de isovalores, que podem ser de grande utilidade no planejamento experimental e na interpretação do comportamento espacial dos dados (BURGESS; WEBSTER, 1980), auxiliando no planejamento das atividades agrícolas e no fornecimento de subsídios para tomadas de decisões. Cristóbal et al. (1996) e Robaina e Seijas (2002), estudando a distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em uma área com cana-de-açúcar, afirmaram que o método de interpolação por krigagem pode ser muito útil quando se quer obter os mapas de isolinhas de um atributo com altos coeficientes de variação, como no caso da condutividade hidráulica do solo saturado.

2.4.3 Semivariograma cruzado

O semivariograma cruzado é uma ferramenta geoestatística que permite verificar a continuidade cruzada entre as variáveis regionalizadas, tornando possível avaliar se a variabilidade de uma série é acompanhada pela da outra, de forma direta como indireta. Por exemplo, propriedades do solo e atributos da planta, condutividade hidráulica e retenção de água, as quais são difíceis e caras para se medir, tais como a granulometria da camada superficial do solo. A facilidade de se utilizar os teores granulométricos em estimativas tem atraído o interesse de pesquisadores que utilizam modelos para predição da produtividade das culturas, erosão e potencial de produção. Em situações nas quais há a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de

ambas, que são expressas no semivariograma cruzado, sendo o método chamado de co-krigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (SOUZA, 1992; VIEIRA, 1997; 2000).

2.4.4 Co-krigagem

Algumas variáveis apresentam grande dificuldade de determinação, qual seja quanto ao tempo para a análise, ou quanto ao custo das análises (GUIMARÃES, 2000). O conhecimento das relações entre as variáveis pode contribuir para a realização de estimativas de variáveis em função de outros atributos (KIEHL, 1979), isto quando existir correlação espacial entre duas variáveis, modelada pelo semivariograma cruzado, sendo possível estimar o valor de uma variável para um determinado local não amostrado pela técnica de co-krigagem, com base na correlação espacial de outra variável. A co-krigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para que sua aplicação seja possível é necessário que ambas estejam correlacionadas, para que o variograma cruzado seja representativo (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Ela pode ser utilizada para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração (como exemplo, a condutividade hidráulica), com base em uma outra medição mais fácil (por exemplo, o teor de argila), desde que sejam correlacionadas espacialmente. Essa estimativa pode ser até mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o semivariograma cruzado mostrar dependência espacial entre duas variáveis (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000).

2.4.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer pôde-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica do refinamento polinomial. A geoestatística é a ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos. Dessa forma, uma variável Z , que é distribuída ordenadamente no espaço s , é tida como variável regionalizada $Z(s)$. Portanto, pode ser representada espacialmente pelo semivariograma, partindo-se do pressuposto de que seja intrínseca, isto é, de que seus incrementos sejam estacionários. Entretanto, em muitos casos ela não satisfaz essa condição, de forma a caracterizar o fenômeno por exibir uma tendência, isto é, de não ser intrínseca e, portanto, não-estacionária. A Figura 2 ilustra tipicamente o semivariograma não-estacionário e o estacionário. Assim, por se tratar de variável não-estacionária, se decompõe em:

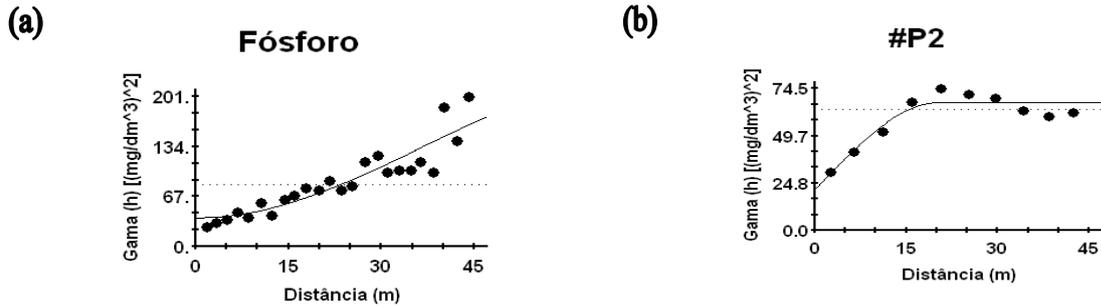


Figura 2. Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.

$$Z(s) = m(s) + R(s).....(4)$$

onde: **m(s)** é a tendência ou deriva e **R(s)** é o resíduo (MATHERON, 1962; ARMESTO, 1999).

Segundo Davis (1986), a tendência **m(s)** da variável **Z(s)**, que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x, y) do ponto amostral, na qual o componente aleatório vai ficar modelado no resíduo, pode ser obtida pela técnica da regressão múltipla polinomial, quando **m(s)** é obtida em função dos valores das coordenadas cartesianas (x, y) do ponto. As expressões testadas são a linear, quadrática e a cúbica, relacionadas a seguir:

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y.....(5)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy.....(6)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x.....(7)$$

Dessa forma, a eleição da tendência **m(s)**, efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação. Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo **R(x,y)**, a partir da eq. (7), efetuando-se:

$$R(x,y) = Z(x,y) - m(x,y).....(8)$$

Portanto, com tais resíduos, poderão ser efetuados os tratamentos necessários aos dados, tais como o ajuste do semivariograma e sua validação. Finalmente, a soma dos resíduos aos respectivos desvios resultará na estimativa da variável $Z^*(x,y)$, com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme:

$$Z^*(x,y) = m^*(x,y) + R^*(x,y).....(9)$$

onde: $Z^*(x,y)$ é a estimativa da variável não-estacionária $Z(s)$, $m(x,y)$ é a tendência da variável $m(s)$, e $R^*(x,y)$ é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Desta forma, pode-se calcular novamente o semivariograma, com os resíduos obtidos deste procedimento, e a designação dos atributos aos quais foi extraída a tendência é # atributo. Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e indicam na legenda do mapa de krigagem valores variando entre positivos e negativos, devido tais valores serem os resíduos, para que na legenda do mapa de krigagem possa aparecer o valor original do atributo que se está estudando, efetua-se a interpolação do mapa de krigagem com os valores dos resíduos. Assim, quando é realizado este cálculo pelo programa GS⁺ (2004), é gerado um arquivo Excel, que possui todas as interpolações calculadas para o número de vizinhos estipulado anteriormente. A partir do número ideal de vizinhos, estipulado pela validação cruzada prévia, pode-se calcular o $R^*(x,y)$. Seguidamente, pode-se calcular o $m^*(x,y)$, a partir dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do $R^*(x,y)$ e do $m^*(x,y)$ podem ser calculados os valores do atributo retrotransformado pelo uso da Equação (9). Com isso, retorna-se ao GS⁺ e efetua-se a krigagem com tais valores retrotransformados (#atributo), obtendo-se o mapa de krigagem final.

2.4.6 Variabilidade espacial aplicada à cultura do feijoeiro e aos solos

No geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta atributos físicos, tais como a permeabilidade, estrutura, densidade global e a porosidade, de forma adequada ao desenvolvimento das plantas. Nessas condições, o seu volume explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que ele vai sendo submetido ao uso agrícola, seus atributos, sobretudo os físicos, sofrem alterações geralmente desfavoráveis ao vegetal (ANDREOLA et al., 2000).

Vários trabalhos têm demonstrado que o tipo de exploração agrícola afeta peculiarmente alguns atributos físicos do solo (ALBUQUERQUE et al., 1995; SOUZA et al., 1997; SOUZA et al., 1998; ANDREOLA et al., 2000; SOUZA et al., 2001; BRITO et al.,

2006; SIQUEIRA et al., 2008). Tem sido apregoado que a rotação de culturas, estabelecida no sistema plantio direto, incluindo espécies com sistema radicular agressivo e com diferentes quantidades de fitomassa, pode alterar os atributos físicos do solo, melhorando desta forma, a produtividade das culturas (DA ROS et al., 1997; ALBUQUERQUE et al., 2001). Por outro lado, atributos tais como a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e a densidade do solo, têm sido utilizados para indicar restrições ao desenvolvimento das plantas. Assim, Unger; Kaspar (1994) destacaram que a compactação do solo reduz o crescimento vegetal, principalmente quando o suprimento de água e nutrientes é insuficiente, fato verificado quando as raízes se desenvolvem abundantemente sobre as camadas compactadas.

A vegetação natural dos cerrados brasileiros vem gradativamente sendo substituída por culturas anuais, pastagens e reflorestamentos. Os solos deste ecossistema nativo normalmente revelam satisfatórios atributos físicos do ponto de vista agrícola. Entretanto, a partir do momento em que são intensamente utilizados à produção agrícola, sofrem substanciais alterações. De modo geral, verificam-se aumentos da densidade do solo, da resistência mecânica à penetração e da microporosidade e diminuições da porosidade total e da macroporosidade (MIRANDA, 1993; ANJOS et al., 1994; ALBUQUERQUE et al., 1995; PENA et al., 1996; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; IMHOFF et al., 2001, CARVALHO et al., 2002a; ARAÚJO et al., 2003; BEUTLER et al., 2004; SILVA et al., 2005; SOUZA et al., 2006; VERONESE JÚNIOR et al., 2006; LIMA et al., 2007).

Lima (2007), estudando um Latossolo Vermelho distrófico no município de Pereira Barreto (SP), sob o cultivo de milho em sistema de plantio direto irrigado, encontrou valores médios de densidade da partícula de 2,46; 2,47 e 2,44 kg dm^{-3} para as profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, respectivamente.

A redução do teor de água do solo proporciona aumento da resistência à penetração, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas (GERARD et al., 1972). Souza et al. (2001) encontraram valores de resistência à penetração do solo entre 2,21 MPa e 2,57 MPa, referentes à umidade de 0,17 kg kg^{-1} nas profundidades entre zero – 0,05 m e 0,15 – 0,20 m respectivamente, estudando a variabilidade espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico estabelecido com a cultura do feijoeiro. Freddi et al. (2005), estudando os sistemas de preparo convencional e o plantio direto para a cultura do feijoeiro, encontraram valores de resistência à penetração de 2,18 MPa para a profundidade de zero – 0,10 m e de 4,26 MPa para a de 0,10 – 0,20 m no plantio convencional, assim como de 6,74 MPa para a profundidade de zero – 0,10 m e 8,27 MPa para a de 0,10 – 0,20 m no plantio direto.

O estudo da variabilidade espacial dos nutrientes no solo é uma fase importante para o estabelecimento da agricultura de precisão. Nesta etapa, a utilização dos semivariogramas permite planejar desenhos ótimos de amostragem do solo, no intuito de capturar a variabilidade em escalas espaciais. A variabilidade espacial dos nutrientes pode não ser igual entre si, ou seja, alguns nutrientes necessitam de números maiores de amostras que outros, para que se possa conhecer seus comportamentos em relação a uma determinada área. Uma maneira de solucionar estes problemas seria a adoção de métodos geoestatísticos para avaliar a variabilidade espacial da fertilidade do solo (DEUTSCH; JOURNAL, 1998).

A variabilidade do solo é consequência de complexas interações dos fatores e processos de sua formação, sendo influenciada pelas práticas de manejo e pelas culturas. Áreas pedologicamente similares podem apresentar diferença na variabilidade quando submetidas a diferentes práticas de manejo. E áreas pedologicamente diferentes, quando submetidas ao mesmo manejo, podem apresentar atributos semelhantes (CORÁ et al., 2004). Dados georreferenciados em estudos da variabilidade espacial de atributos do solo de uma propriedade agrícola permitem a obtenção de mapas de fertilidade de solos e o estabelecimento de estratégias de aplicação de fertilizantes, sendo a análise exploratória dos dados uma etapa de fundamental importância e obrigatória em qualquer tipo de estudo deste tipo (BURROUGH et al., 1996). A variabilidade espacial dos índices de fertilidade do solo aumenta com a adoção do sistema plantio direto, quer no sentido horizontal, pela distribuição irregular na superfície do solo (KLEPKER; ANGHINONI, 1995; COUTO, 1997), quer ainda no sentido vertical, pelas diferenças nos teores de uma camada mais superficial em relação à outra mais abaixo (ELTZ et al., 1989; AMARAL; ANGHINONI, 2001). Neste sistema, os resíduos dos vegetais provocam alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, causando alterações no movimento e na redistribuição de compostos mais solúveis. As freqüentes adubações e calagens em superfície tendem a formar um gradiente de concentração superficial (ELTZ et al., 1989), causando variabilidade dos índices de pH do solo e dos teores de nutrientes. A matéria orgânica do solo também tem sido amplamente citada como um indicador-chave da qualidade do solo em áreas agrícolas (ZECH et al., 1997), pois exerce um papel fundamental no solo, agindo em sua estrutura pelo fornecimento de substâncias agregantes, no suprimento de macro e de micronutrientes, na capacidade catiônica e no tamponamento do pH (SILVA; PASQUAL, 1999).

A adoção do sistema plantio direto vem expandindo-se por toda a região Central do Brasil, sendo uma alternativa para a substituição do sistema convencional de preparo do solo, podendo contribuir para a sustentabilidade de sistemas agrícolas intensivos. Souza (1992)

pressupôs que o plantio direto apresentasse maior variabilidade nos teores de matéria orgânica e de nutrientes no perfil do solo, do que o sistema convencional, em decorrência do não-revolvimento da camada superficial do solo, e segundo Thung e Oliveira (1998), solos com uso do cultivo mínimo e do plantio direto podem, ao longo do tempo, ter seus teores de matéria orgânica aumentados.

Zanão Júnior et al. (2007), estudando a variabilidade espacial do teor de matéria orgânica nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0-0,20 m em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta, encontraram valores médios de 3,67; 3,38; 3,58 (dag kg⁻¹) mostrando baixa variação na área amostrada. Falleiro et al. (2003), mostraram que a semeadura direta promoveu aumento dos teores de matéria orgânica e conseqüentemente dos teores de nutrientes das camadas superficiais dos solos. Avaliando a influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo câmbico nas profundidades 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 m foram obtidos valores médios de matéria orgânica de 39,74; 28,78; 24,67 (g dm⁻³), respectivamente, e de pH em água de 4,75; 4,62; 4,54, respectivamente.

O uso dos solos para as atividades agrícolas aumentou os teores de P total da camada arável, pois as quantidades desse nutriente, adicionadas por meio dos fertilizantes fosfatados, nas últimas décadas, superaram as quantidades exportadas pelas colheitas e pela erosão, alterando a magnitude das frações inorgânicas (BALL-COELHO et al., 1993; BECK; SANCHEZ, 1994; ARAÚJO; SALCEDO, 1997). No sistema plantio direto, os fertilizantes são aplicados na superfície do solo sem a posterior incorporação, o que tem aumentado grandemente os teores de P total da camada superficial. No entanto, o aumento nas formas orgânicas não acompanha o rápido incremento no P total (SELLES et al., 1997; RHEINHEIMER et al., 1998). Kunishi et al. (1982), também, constataram que o P adicionado na superfície permaneceu como fosfato de cálcio, tornando-se menos adsorvido pelos colóides do solo sob sistema de plantio direto por três anos.

Rheinheimer et al. (2001), avaliando a modificação nas frações do P inorgânico provocadas por diferentes preparos do solo em um Latossolo Vermelho distroférico típico em três camadas (0-0,025; 0,025-0,075; 0,075-0,175 m) envolvendo os sistemas de plantio direto e cultivo mínimo, puderam observar que no sistema plantio direto ocorreu um grande acúmulo na camada superficial, indicando que a ciclagem do fósforo é menos eficiente do que a do nitrogênio e do carbono, pois sofre reações de adsorção, e é mineralizado preferencialmente, o que resulta em acúmulo pronunciado de P inorgânico na camada superficial.

O levantamento da variabilidade espacial da produção agrícola pode ser entendido como uma etapa importante do seu gerenciamento, podendo ser efetuado pelas técnicas da agricultura de precisão. Ainda que existam inúmeras possibilidades para se tratar as áreas produtivas de acordo com suas limitações, somente com o conhecimento da variabilidade da produção é possível determinar quais práticas agrícolas utilizadas são eficazes para elevar tal produção, com a redução dos custos. As informações obtidas por meio do mapeamento da produtividade podem ser utilizadas para uma série de análises e interferências na área. Por meio da coleção de mapas de produtividade é possível identificar como a variabilidade ocorre em termos de distribuição espacial, temporal e em termos quantitativos (MACHADO et al., 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de origem dos dados

O trabalho foi desenvolvido no ano agrícola 2006/2007, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, localizada no município de Selvíria (MS), na latitude 20°22'S e na longitude 51°22'W, com precipitação média anual de 1300 mm e temperatura média de 23,7°C. O tipo climático é A_w, segundo a classificação de Koeppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (DEMATTÊ, 1980). O solo no qual as malhas experimentais foram instaladas, irrigado por um sistema de pivô central (Figura 3) foi classificado por Demattê (1980) e reclassificado ⁽¹⁾ segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos



Figura 3: Aspecto geral da área experimental implantada com a cultura do feijoeiro sob pivô central

(EMBRAPA, 2006), é um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico muito argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulínítico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido (Typic Acrustox), com declividade homogênea de 0,055 m m⁻¹. No quadro 1 estão apresentados a caracterização efetuada em 1980, por ocasião do levantamento taxonômico detalhado (DEMATTÊ, 1980).

⁽¹⁾ CARVALHO, M. P. Comunicação pessoal. 2009. (Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - Faculdade de Engenharia – FE/UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil).

Quadro 1. Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
Ap	0-15	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; granular, pequena a média, moderado a forte; duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
A ₃	15-30	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; blocos e granular, moderado; friável, plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
B ₂₁	30-100	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/4); franco-argilo arenoso; maciço, poroso, muito fraco; macio, friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
B ₂₂	100-170+	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/6); franco-argilo arenoso; maciço, muito fraco; macio, muito friável, plástico e pegajoso.

Horizonte		Composição granulométrica da TFSA			Relação	Densidade
Símbolo	Profundidade	areia	silte	argila	silte/argila	do solo
	cm	g kg ⁻¹				kg dm ⁻³
Ap	0-15	230	120	650	0,185	1,30
A ₃	15-30	210	120	670	0,179	1,20
B ₂₁	30-100	160	130	710	0,183	1,20
B ₂₂	100-170+	160	120	720	0,167	1,10

Horizonte		Complexo sortivo											
Símbolo	Profundidade	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	Al ³⁺	H ⁺	CTC	V%	m%	MO	
	cm	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³										g dm ⁻³
Ap	0-15	1,0	17,0	15,4	0,8	33,2	1,0	40,0	74,2	45	3	16,6	
A ₃	15-30	0,0	1,5	1,6	0,5	3,6	8,0	33,0	4,46	8	69	13,6	
B ₂₁	30-100	1,0	0,5	0,4	0,4	1,3	5,0	32,0	3,83	3	79	10,2	
B ₂₂	100-170+	0,0	1,0	0,8	0,5	2,3	2,0	28,0	3,23	7	47	4,1	

Horizonte		pH			Ataque sulfúrico				Ki	Kr
Símbolo	Profundidade	H ₂ O	KCl	ΔpH	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂		
	cm	dag kg ⁻¹								
Ap	0-15	5,1	4,8	-0,3	20,60	15,17	28,21	4,06	2,31	1,05
A ₃	15-30	4,9	4,3	-0,6	21,35	16,98	26,18	4,03	2,13	1,07
B ₂₁	30-100	4,9	4,2	-0,7	23,58	32,28	28,30	3,61	1,14	0,75
B ₂₂	100-170+	5,3	4,6	-0,7	22,59	16,84	27,89	3,67	2,28	1,10

3.2 Caracterização inicial do solo estudado

O solo estudado vem há pelo menos vinte anos sendo cultivado com a sucessão de culturas milho/feijão, respectivamente semeadas no verão e inverno. Nos anos de 1998 e 2003, para os dois casos, o solo foi preparado com o arado de aivecas. Contudo, nos demais, as culturas foram implantadas pelo sistema plantio direto. Especificamente antes da semeadura do presente experimento, em 05/05/2006, a área experimental foi cultivada com milho e, após colheita, dessecada com uma aplicação de $1,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (p.a.) do herbicida glyfosate.

Inicialmente, entre março e maio de 2006, visando à caracterização do solo antes da instalação do experimento, coletaram-se sessenta amostras deformadas e indeformadas em três profundidades (0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m), destinadas às análises físicas e químicas, sendo processadas conforme EMBRAPA (1979), Stolf (1991) e Raij et al. (2001). Para tanto, os locais de coleta das amostras simples foram determinados de forma aleatória nas entrelinhas da cultura semeada anteriormente (milho). Assim, foram efetuadas as seguintes determinações: a) macroporosidade (MA), b) microporosidade (MI), c) porosidade total (PT), d) densidade no solo (DS), e) resistência à penetração (RP), f) umidade gravimétrica (UG), g) umidade volumétrica (UV), h) capacidade de campo (CC), i) análises químicas de rotina para fins de fertilidade: matéria orgânica (MO), pH, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, Al^{3+} , soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). Nos Quadros 2 e 3 e na Figura 4 estão apresentados as análises iniciais destes atributos físicos e químicos do solo. Assim, sabe-se que em condições de mata virgem os latossolos apresentam, na camada entre 0-0,30m, valores da densidade do solo entre $0,90$ e $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$ (OLIVEIRA; MONIZ, 1975). Por outro lado, nessa camada concentra-se a maior parte do sistema radicular do feijoeiro, que é substancialmente sensível à compactação do solo (FAHL et al., 1998). Dessa forma, com base nesses fatos e nas análises efetuadas, uma vez que o solo encontrava-se compactado e com necessidade de calagem, foi decidido estudar duas malhas geoestatísticas, correspondentes a dois tratamentos distintos. No primeiro, como o solo permaneceu nas condições do cultivo da época (sistema plantio direto) procurou-se efetuar o mesmo, isto é, trabalhou-se com o sistema plantio direto (PD). Já no segundo, objetivando verificar o efeito que a escarificação do solo poderia ter sobre a produtividade da cultura, instalou-o no sistema de cultivo mínimo escarificado do solo (CM). Na instalação do tratamento com o sistema de cultivo mínimo escarificado do solo (CM) foi utilizado previamente o escarificador da marca Jan, modelo Jumbo Matic JMHD, com 7 hastes espaçadas de 0,40 m entre si, com discos de cortes frontais individuais para cada haste,

Quadro 2: Análise inicial de alguns atributos físicos do solo estudado

Atributo físico ^(a)									
Profundidade	Porosidade			DS	Resistência à penetração/umidade			Capacidade de campo	
	MA	MI	PT		RP	UG	UV	UG	UV
m	m ³ m ⁻³			kg dm ⁻³	MPa	kg kg ⁻¹	m ³ m ⁻³	kg kg ⁻¹	m ³ m ⁻³
0 – 0,10	0,102	0,403	0,505	1,337	1,060	0,228	0,305	0,250	0,334
0,10 – 0,20	0,090	0,420	0,510	1,444	2,008	0,231	0,334	0,250	0,361
0,20 – 0,30	0,092	0,408	0,500	1,429	3,246	0,220	0,314	0,250	0,357

^(a) MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica.

Quadro 3: Análise inicial de alguns atributos químicos para fins de fertilidade do solo estudado

Atributo químico ^(a)												
Profundidade	MO	pH CaCl ₂	Complexo sortivo									
			P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	SB	CTC	V%	m%
m	g dm ⁻³		mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³							%	
0 – 0,10	26	5,0	23	2,5	21	13	38	1,5	36,5	74,5	49,0	4,0
0,10 – 0,20	22	5,1	15	2,7	21	13	36	1,0	36,7	72,7	50,5	2,7
0,20 – 0,30	25	5,2	11	3,0	21	14	35	1,0	38,0	73,0	52,1	2,6

^(a) MO = matéria orgânica, V% = índice de saturação por bases, m% = índice de saturação por alumínio.

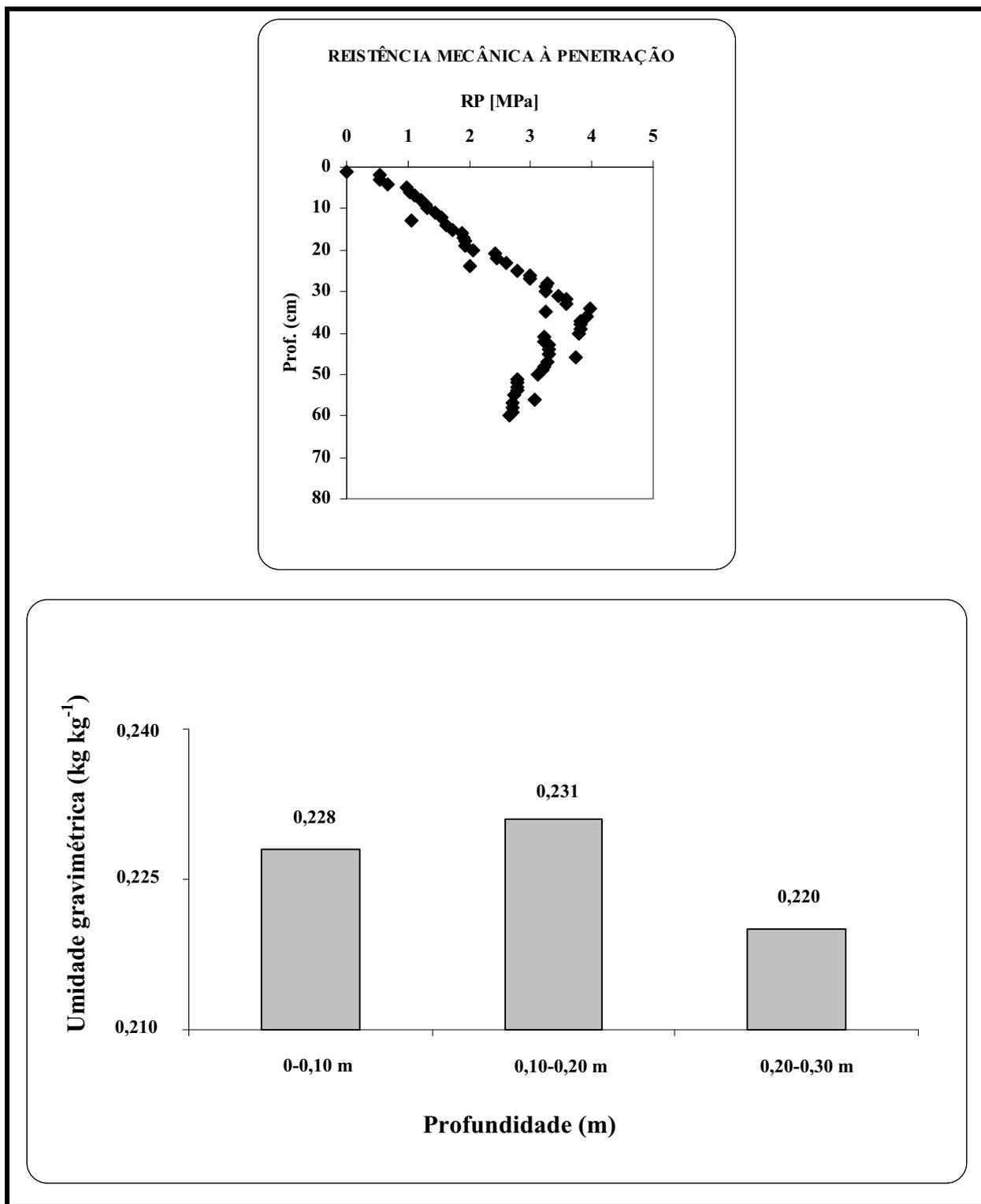


Figura 4: Curva da resistência à penetração e valores da umidade gravimétrica nas três camadas estudadas do solo

com largura do chassi de 2,80 m e rolo destorroador nivelador dentado, tracionado pelo trator de pneu Massey-Ferguson, modelo-660, com potência de 110,2 kW no motor e tração dianteira auxiliar com massa de 8175 kg. Assim, a profundidade de escarificação efetuada foi de 0,30 m. Para a semeadura do feijão, tanto no tratamento com o sistema de cultivo mínimo escarificado do solo (CM) quanto no sistema plantio direto (PD), foi utilizada a semeadora-adubadora de plantio direto marca Tatu Marchesan, modelo Suprema-Pneumática (D-44), com 7 linhas espaçadas de 0,45 m, configurada para plantio direto com discos de corte, mecanismo sulcador-adubador de discos duplos, sulcador-distribuidor de sementes de discos duplos e roda compactadora côncava. Tal semeadora foi tracionada pelo trator de pneu Massey-Ferguson, modelo Valmet 985, potência de 59,6 kW no motor e massa de 4230 kg.

3.3 Implantação e condução da cultura do feijoeiro

Foram pesquisados os atributos do presente estudo pelo uso de duas malhas de coleta de dados de campo, em dois sistemas de manejo, a saber, o cultivo mínimo (CM) e o plantio direto (PD), numa área sob o sistema de irrigação com o pivô central. Para tanto, elas foram alocadas entre dois terraços agrícolas, distanciadas de 20 m. Na área determinada para o estudo do sistema de cultivo mínimo, o preparo do solo constituiu-se de uma escarificação. Já na área do sistema de plantio direto, realizou-se apenas a dessecação das plantas daninhas antecedentes ao feijoeiro, com uma aplicação de 1,8 kg ha⁻¹ (p.a.) do herbicida glyphosate, sendo ambas as áreas preparadas entre 04 e 05/05/2006. Em 06/05/2006 foi semeada, nas duas áreas, o cultivar Pérola, no espaçamento de 0,45 m entrelinhas, com a densidade de 300000 plantas por hectare. Para tanto, empregou-se a quantia média de 14 sementes por metro de semeadura. As práticas normais de condução da cultura, tais como o tratamento fitossanitário e o cultivo químico, foram procedidas homoganeamente em toda a área experimental, conforme recomendações de Fahl et al. (1998).

3.4 Implantação e caracterização das malhas experimentais de campo

Foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, num lançante estabelecido entre dois terraços agrícolas. Empregou-se o nível ótico comum, efetuando-se o estaqueamento global das malhas experimentais após a semeadura do feijão, isto é, no primeiro decêndio de junho/2006, espaçadas de 20 m entre elas. Cada malha experimental foi constituída de nove transeções de 40 m x 40 m. Numa delas, o solo permaneceu segundo a formalidade necessária para o sistema plantio direto (PD), ao passo que noutra foi escarificado (CM). Portanto, as transeções foram espaçadas de 5,00 m, com pontos amostrais esquadrejados em 5,00 m x 5,00 m, contendo 81 deles. Entretanto, foram alocados, dentro da grande malha, pontos com espaçamentos menores do que os mencionados, com espaçamento

de 1,67 m entre eles, visando detalhar o estudo da dependência espacial. Como nesse caso foram 36, o total de pontos amostrais, em cada malha de dados, foi de 117. A Figura 5 representa o esquema de uma das malhas experimentais de campo, uma vez que a outra foi idêntica, com evidência para a orientação geográfica e o sentido da declividade do solo ($0,055 \text{ m m}^{-1}$).

3.5 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

Os atributos determinados foram do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral, que normalmente foi constituído da coleta dos dados da planta posicionada no centro e de suas circunvizinhas. A etapa laboratorial das análises físicas e químicas do solo foi realizada entre os meses de agosto e dezembro de 2006. Os atributos do solo foram a densidade do solo (**DS**), densidade da partícula (**DP**), porosidade total (**PT**), resistência à penetração (**RP**), umidade gravimétrica (**UG**), umidade volumétrica (**UV**), teor de matéria orgânica (**MO**), de fósforo (**P**) e **pH** em CaCl_2 , coletados nas profundidades: 1) 0-0,10 m, 2) 0,10-0,20 m e 3) 0,20-0,30 m.

A resistência à penetração (**RP**) foi avaliada com o penetrômetro de impactos (Stolf, 1991) e calculada segundo expressão contida em Rosa Filho et al. (2009):

$$\text{RP} = \{5,581 + 6,891 \cdot \{N/(P-A)\} \cdot 10\} \cdot 0,0981 \dots \dots \dots (10)$$

onde: **RP** é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); **N** é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para obtenção da leitura; **A** e **P** as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm). A amostra deformada do solo para determinação da umidade gravimétrica (**UG**) foi coletada no mesmo momento que o da resistência mecânica, com um trado de caneca. A densidade do solo (**DS**) foi calculada pelo método do anel volumétrico, ao passo que, a densidade da partícula (**DP**), pelo método do álcool (balão volumétrico). Dessa forma, a porosidade total do solo (**PT**) foi calculada conforme a Equação (11) apresentada pela EMBRAPA (1979):

$$\text{PT} = [1 - (\text{DS} \cdot \text{DP}^{-1})] \dots \dots \dots (11)$$

onde: **PT** é a porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), **DS** e **DP** são respectivamente as densidades do solo e da partícula (kg dm^{-3}). Por outro lado, o teor de fósforo disponível no solo (**P**) foi determinado pelo método de extração com a resina trocadora de íons, dado em mg dm^{-3} (RAIJ et al., 1987).

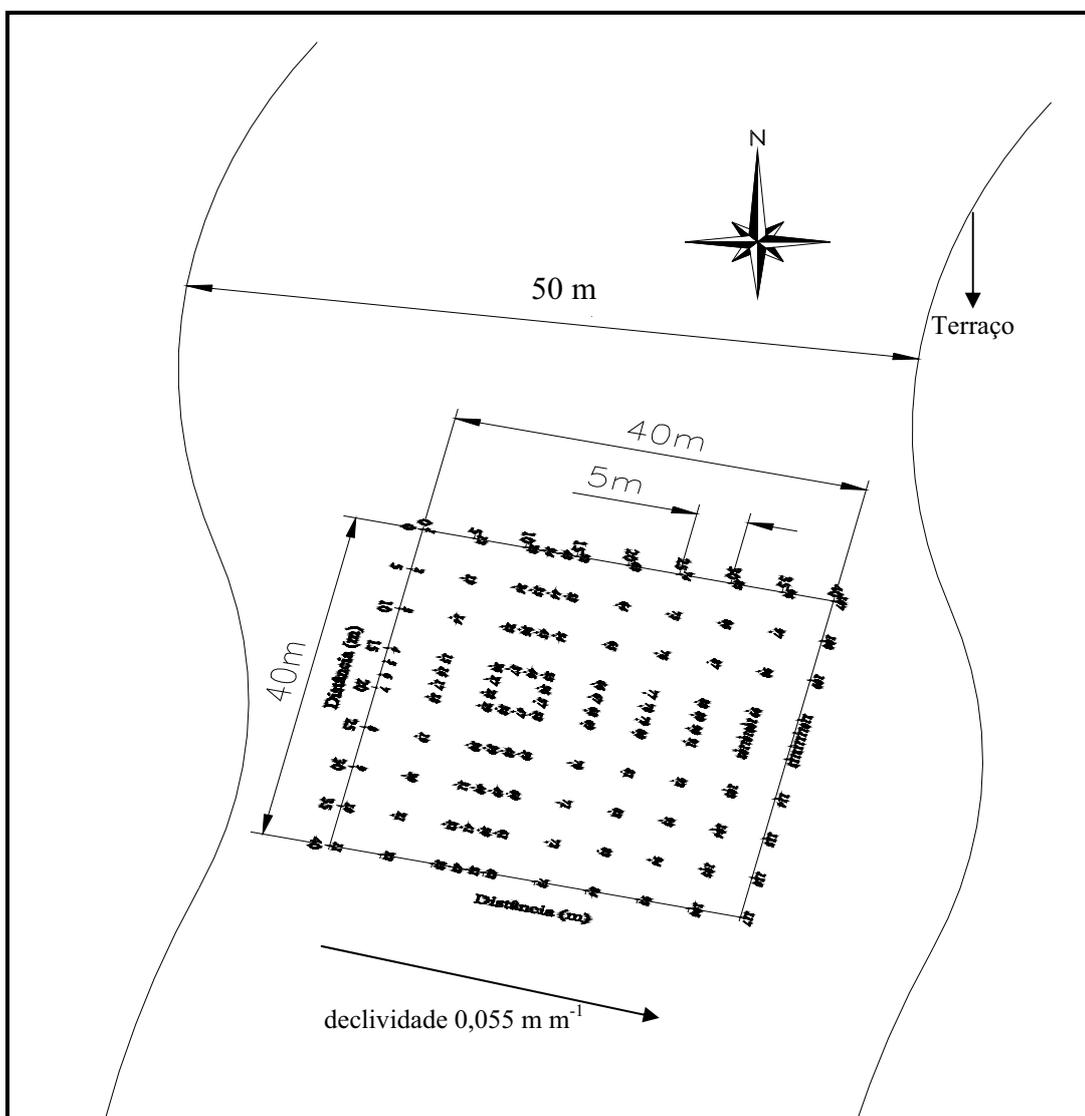


Figura 5. Esquema da malha experimental de campo

A umidade volumétrica (**UV**) foi determinada pelo seguinte cálculo, relacionado em Kiehl (1979):

$$\mathbf{UV=UG \cdot DS \dots\dots\dots(12)}$$

onde: **UV** é a umidade volumétrica [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], **UG** é a umidade gravimétrica [kg kg^{-1}], e **DS** é a densidade do solo [kg dm^{-3}]. Para a **UG** foram utilizadas amostras deformadas de solo, coletadas com uma sonda caladora.

Já o **pH** foi determinado potenciométricamente em solução de CaCl_2 0,01M (BRASIL, 1979), enquanto que o carbono orgânico o foi pelo método da combustão úmida, via colorimétrica, resultando no teor de matéria orgânica do solo (**MO**) pela seguinte expressão (Raij et al., 1987):

$$\mathbf{MO = C \cdot 17,24\dots\dots\dots(13)}$$

onde: **MO** é o teor de matéria orgânica (g dm^{-3}) e **C** é o teor de carbono (g dm^{-3}). Todas as análises foram efetuadas no Laboratório de Física e Química do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. Portanto, a síntese dos 27 atributos do solo nas respectivas profundidades foi: a) profundidade 1: DS1, DP1, PT1, RP1, UG1, UV1, MO1, P1 e pH1; b) profundidade 2: DS2, DP2, PT2, RP2, UG2, UV2, MO2, P2 e pH2, e c) profundidade 3: DS3, DP3, PT3, RP3, UG3, UV3, MO3, P3 e pH3.

Os atributos avaliados da cultura do feijoeiro foram: a) produtividade de grãos (**PRG**), com os valores transformados para as condições padronizadas de $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$ de umidade, representados em kg ha^{-1} , b) número de vagens por planta (**NVP**), c) número de grãos por vagem (**NGV**), d) número de grãos por planta (**NGP**), e e) massa de cem grãos (**MCG**), em grama. Coletaram-se todas as plantas originadas do entorno do ponto amostral estaqueado. A área representativa dessa coleta foi de $3,20 \text{ m}^2$, com 4 linhas de plantas (1,80 m x 1,80 m).

A coleta dos atributos físicos e químicos do solo, ponto por ponto, foi realizada em 18 de junho de 2006. A colheita da cultura de feijão, consistida do arranquio das plantas e o acondicionamento do material em saco de polietileno previamente identificado, efetuada aos 100 dias após a semeadura (14/08/2006). Seguidamente, o material proveniente de cada ponto amostral foi colocado para secagem num terreiro sob o sol. Posteriormente, a trilha/debulha foi efetuada com o pisoteio por rodado de trator, sobre todos os sacos, devidamente amontoados em um terreiro (trilha no terreiro). Em seguida, foram peneirados de forma a se

obter separadamente a palhada da planta e os grãos do feijão. As Figuras 6 e 7 apresentam a cultura de feijão, respectivamente no início e no final do desenvolvimento, para o sistema de cultivo mínimo do solo. Analogamente, para o sistema de plantio direto as Figuras 8 e 9 apresentam o mesmo.

3.6 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva auxiliada pela estatística clássica. Utilizando-se o SAS (SCHLOTZHAVER; LITTEL, 1997) calculou-se a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Seguidamente foram identificados os pontos anômalos (*outliers*), conforme identificação no gráfico de ramos e folhas, efetuando-se a substituição deles pelo valor médio dos circunvizinhos presentes na malha geoestatística. Também foi efetuada a análise da distribuição de frequência dos dados. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos atributos (x), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal. Assim, no caso de dados transformados na forma logarítmica ($y = \ln x$), W testa a hipótese nula de que os valores y_i provêm de uma distribuição normal, isto é, os dados não transformados (x_i) ajustam-se a uma distribuição lognormal.

Foi realizado o teste F para estudar a significância estatística, para os atributos da planta e do solo, entre os dois tratamentos empregados (CM e PD) utilizando o pacote computacional SAEG. Foi montada a matriz de correlação, visando efetuar as regressões lineares para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta) para cada tratamento. O objetivo foi estudar a correlação linear entre eles, na tentativa de selecionar aqueles de elevada correlação, e que provavelmente poderiam apresentar semivariograma cruzado e, portanto, co-krigagem. Por outro lado, para cada camada estudada do solo, assim como para todas conjuntamente, foram efetuadas as regressões lineares múltiplas entre as variáveis independentes (solo) e as dependentes (planta) objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, por intermédio do EXCEL. Para os atributos que não apresentaram dependência espacial, isto é, na ausência de estacionariedade, retirou-se a tendência dos dados por meio da técnica da regressão múltipla polinomial, conforme preceitos de Matheron (1962), Davis (1986) e de Armesto (1999). Portanto, para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com bases nos pressupostos de estacionariedade da hipótese intrínseca, usando o pacote *Gama Design Software* (GS^+ , 2004). Foram ajustados semivariogramas simples a todos os atributos estudados da planta (PRG, NVP, NGV, NGP e



Figura 6: Vista geral da cultura do feijoeiro no início do desenvolvimento, no sistema **cultivo mínimo** do solo



Figura 7: Vista geral da cultura do feijoeiro ao final do desenvolvimento, no sistema **cultivo mínimo** do solo



Figura 8: Vista geral da cultura do feijoeiro no início do desenvolvimento, no sistema **plantio direto**



Figura 9: Vista geral da cultura do feijoeiro ao final do desenvolvimento, no sistema **plantio direto**

MCG) e do solo (DS1, DS2, DS3, DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, RP1, RP2, RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV2, UV3, MO1, MO2, MO3, P1, P2, P3, pH1, pH2 e pH3).

Seguidamente, ajustaram-se semivariogramas cruzados entre as seguintes combinações de atributos, pelo uso do GS⁺ (2004): a) planta x planta, b) planta x solo, e c) solo x solo. O objetivo foi definir os pares de melhor representatividade, isto é, qual atributo, tido como variável secundária apresentou melhor correlação espacial explicativa do atributo tido como variável primária.

Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função de seus modelos, foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) o maior coeficiente de determinação (r^2); b) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**), e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (**ADE**). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou co-krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos. Para cada atributo, foram estimados o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a Equação 03.

A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que efetuarão respectivamente a krigagem e a co-krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se ele não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* observados, para todos os pontos. O coeficiente de correlação (r) entre tais valores reflete a eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Um ajuste perfeito teria o coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1 (GS⁺, 2004). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de co-krigagem, para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos dados

4.1.1 Cultivo mínimo

4.1.1.1 Variabilidade dos atributos

4.1.1.1.1 Atributos da planta

No Quadro 4 está apresentada a análise descritiva dos atributos estudados para o cultivo mínimo. De acordo com Pimentel Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$). Portanto, a produtividade de grãos do feijão (PRG) e o número de grãos por vagem (NGV) apresentaram média variabilidade, com coeficientes de variação de 18,3% e 12,4%. Assim, neste aspecto foi igual aos obtidos por Freddi (2003) estudando um Latossolo Vermelho Distroférico sob preparo convencional, Santos et al. (2005), em um Latossolo Vermelho Distroférico sob preparo convencional e Megda et al. (2008) avaliando um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto, que também encontraram valores de média variabilidade (17%, 17% e 19%). Já Martins (2007) e Kitamura et al. (2007), quando analisaram um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto em malhas regulares de 135 pontos amostrais ambas, encontraram alta variabilidade de 24% produtividade de grãos do feijão. Já o número de vagens por planta (NVP) e o número de grãos por planta (NGP) apresentaram alta variabilidade com coeficientes de variação de 20,6% e 24,2%, enquanto a massa de cem grãos (MCG) teve baixa variabilidade 4,4%.

4.1.1.1.2 Atributos do solo

A variabilidade da densidade do solo (DS), da densidade da partícula (DP) e do potencial hidrogeniônico (pH) nas três camadas de solo estudadas foi baixa (Quadro 4), com coeficientes de variação entre 4-10%. Assim, os dados de densidade do solo assemelham-se com aqueles obtidos por Souza et al. (2001), Carvalho et al. (2002b), Mesquita et al. (2003), Johann et al. (2004), Secco et al. (2005), Santos et al. (2006), Lima et al. (2007) e Rosa Filho (2008), os quais variaram entre 3-10%, quando respectivamente trabalharam com um

Quadro 4: Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob **cultivo mínimo**

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^(b)	
			Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
<i>Atributos da planta</i>										
PRG (kg ha ⁻¹)	2034,8	2018,8	1214,9	3152,2	372,4	18,3	0,334	0,458	0,065	NO
NVP	10,2	10,0	6,0	16,0	2,113	20,6	-0,005	-0,308	0,354	LN
NGV	5,8	6,0	5,0	7,0	0,735	12,4	-	-	-	IN
NGP	49,5	50,0	5,0	75,0	11,998	24,2	0,787	-0,319	0,233	NO
MCG (g)	23,3	23,4	19,8	25,7	1,035	4,4	0,679	-0,086	0,197	NO
<i>Atributos físicos do solo</i>										
DS1 (kg dm ⁻³)	1,261	1,246	0,921	1,574	0,127	10,1	-0,072	0,119	0,823	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,311	1,335	0,997	1,507	0,116	8,8	-	-	-	IN
DS3 (kg dm ⁻³)	1,357	1,366	1,170	1,570	0,074	5,5	0,301	-0,216	0,121	NO
DP1 (kg dm ⁻³)	2,235	2,226	1,788	2,550	0,121	5,5	0,788	-0,125	0,369	NO
DP2 (kg dm ⁻³)	2,190	2,183	2,004	2,446	0,100	4,6	-0,477	0,346	0,071	NO
DP3 (kg dm ⁻³)	2,205	2,198	1,913	2,537	0,110	5,0	0,765	0,500	0,052	NO
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,434	0,435	0,264	0,544	0,056	12,9	0,132	-0,499	0,126	NO
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,400	0,395	0,290	0,541	0,052	13,2	0,016	0,103	0,510	LN
PT3 (m ³ m ⁻³)	0,382	0,377	0,242	0,479	0,044	11,5	0,516	-0,124	0,232	NO
RP1 (MPa)	1,096	0,916	0,547	2,981	0,637	58,1	-	-	-	IN
RP2 (MPa)	2,115	2,170	0,547	4,362	1,085	51,3	-	-	-	IN
RP3 (MPa)	2,743	2,801	0,547	5,054	0,964	35,1	0,126	-0,317	0,022	TN
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,207	0,206	0,153	0,277	0,022	10,6	0,381	0,388	0,304	NO
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,220	0,221	0,158	0,301	0,022	10,1	0,829	0,119	0,216	NO
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,231	0,234	0,185	0,286	0,018	8,1	-	-	-	IN
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,262	0,259	0,170	0,362	0,040	15,4	0,192	0,339	0,067	NO
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,289	0,296	0,200	0,383	0,039	13,8	-0,446	0,039	0,255	NO
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,314	0,316	0,247	0,378	0,027	8,9	-0,399	-0,137	0,598	NO
<i>Atributos químicos do solo</i>										
MO1 (g dm ⁻³)	16,3	16,9	8,0	22,9	2,806	17,1	0,366	-0,132	0,032	TN
MO2 (g dm ⁻³)	15,9	15,7	9,1	22,9	2,601	16,4	-0,102	-0,069	0,042	TN
MO3 (g dm ⁻³)	14,7	14,6	5,9	24,2	3,360	22,8	0,106	-0,070	0,184	NO
P1 (mg dm ⁻³)	24,0	20,0	13,0	53,0	10,4	43,4	-	-	-	IN
P2 (mg dm ⁻³)	21,2	19,0	11,0	48,0	9,12	43,0	-	-	-	IN
P3 (mg dm ⁻³)	18,6	4,0	6,0	73,0	12,60	67,9	-	-	-	IN
pH1 (CaCl ₂)	4,7	4,7	4,3	5,4	0,209	4,4	0,134	0,476	0,050	LN
pH2 (CaCl ₂)	4,7	4,7	4,3	5,3	0,207	4,3	0,229	0,453	0,055	NO
pH3 (CaCl ₂)	4,8	4,8	4,2	5,4	0,244	5,1	-0,139	0,196	0,644	NO

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MCG = massa de cem grãos; DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P, pH, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletados nas camadas do solo; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN e IN respectivamente do tipo normal, log-normal, tendendo a normal e indeterminada.

Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto, Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob plantio direto, Latossolo Bruno Distrófico subdividido em parcelas sem manejo localizado e parcelas com manejo localizado, Latossolo Vermelho Distrófico sob cultivo mínimo, Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto, Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto e Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto. Já os dados de densidade da partícula concordaram com os de Lima (2007), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta que foi de 2%. Para os dados de pH, resultados semelhantes foram conseguidos por Freddi (2003) e Bezerra (2008), quando trabalharam em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob preparo convencional e Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto, respectivamente, com coeficientes de variação entre 4-7%.

Em relação à umidade gravimétrica (UG) e a umidade volumétrica (UV), todos apresentaram variabilidade de baixa a média (Quadro 4), com coeficientes de variação entre 8-15%. Esses dados concordam com aqueles de Carvalho et al. (2002b), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional, Santos et al. (2005), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional e Freddi et al. (2006), estudando um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional que variaram entre 5-16%.

A porosidade total (PT) apresentou-se com média variabilidade em ambos os casos (Quadro 4), sendo de 13, 13, e 12% respectivamente em profundidade. Tais dados concordaram, para as camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, com aqueles de Souza et al. (2004), de 17% obtido num Latossolo Vermelho Eutroférrico em uma malha regular espaçada de 10 m, com dimensão de 100 x 100 m, sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de 30 anos. Contudo, discordaram com os de Carvalho et al. (2002b), Secco et al. (2005) e Megda et al. (2008), os quais foram baixos, com valores respectivamente de 4-6% obtidos num Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional, numa malha de 40 x 60 m, com 103 pontos amostrais, 4% também num Latossolo Vermelho Distrófico e de 4-6% num Latossolo Vermelho Distroférrico em uma malha de amostragem constituída de 75 pontos.

A matéria orgânica (MO) apresentou-se com média a alta variabilidade, sendo, em profundidade, de 17, 16 e 23% (Quadro 4). Esses dados concordaram com aqueles de Silveira e Cunha (2002), de 15% e 17% na profundidade de 0-0,05 m e de 15 e 16% na profundidade de 0,05-0,20 m, respectivamente para os tratamentos: arado de aveia e grade aradora pesada, analisado em um Latossolo Vermelho Perférrico, e de Bezerra (2008), quando trabalhado em um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto em uma rede de 50 x 50 m, com 125 pontos amostrais, avaliados nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, que foi de 26 e 23%,

respectivamente em profundidade, sendo considerado como alta variabilidade. Porém, discordaram de Souza et al. (1998), que foi de 8 e 5%, considerado baixa, nas profundidades 0-0,05 e 0,05-0,20 m respectivamente, de um Argissolo Vermelho Escuro sob cultivo mínimo em uma malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m, sendo que os mesmos autores, avaliando um Latossolo Roxo Distrófico sob preparo convencional nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m em uma malha quadrada com 49 pontos (7x7), espaçadas de 10 x 10 m, também encontraram valores de baixa variabilidade (5%, 5% e 10%, respectivamente em profundidade).

Em relação à resistência à penetração (RP) e o teor de fósforo (P), todos apresentaram variabilidade muito alta, com coeficientes de variação entre 35 e 68% (Quadro 4). Assim, tais dados de resistência à penetração concordaram com aqueles de Carvalho et al. (2002b), Araujo et al. (2004), Souza et al. (2006), Veronese Júnior et al. (2006), respectivamente de 110-51% obtidos nas profundidades de 0-0,05 e de 0,15-0,20 m em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional, de 72-63% num Latossolo Vermelho Distroférrico sob cultivo mínimo nas profundidades de 0-0,15 e de 0,15-0,30 m, de 37% para ambas as profundidades de 0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m em um Latossolo Vermelho Distrófico e de 52-30% para as camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, em um Latossolo Vermelho sob preparo convencional em uma malha de 65 pontos espaçados de 10 em 10 m. Contudo, discordaram de Mercante et al. (2003), Johann et al. (2004) e Freddi et al. (2006), respectivamente de 15% obtido num Latossolo Vermelho Distroférrico, 16% num Latossolo Bruno Distrófico e de 14% num Latossolo Vermelho Distrófico. Logo para o fósforo, tais dados concordaram com aqueles de Souza et al. (1998), que foi de 40 e 56%, nas profundidades 0-0,05 e 0,05-0,20 m respectivamente, de um Argissolo Vermelho Escuro sob cultivo mínimo em uma malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m e daqueles de Bezerra (2008), de 58-52%, quando trabalhado em um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto em uma rede de 50 x 50 m, com 125 pontos amostrais, avaliados nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

4.1.1.2 Distribuição de frequência dos atributos

4.1.1.2.1 Atributos da planta

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, será pela mediana, ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (SPIEGEL, 1985). Portanto, os atributos produtividade de grãos (PRG), número de grãos por planta (NGP) e massa de cem grãos (MCG) apresentaram

distribuição de frequência do tipo normal, com coeficientes de assimetria positiva de 0,458 para PRG, e negativa (-0,319 e -0,086) para NGP e MCG. Já os coeficientes de curtose positiva para PRG, NGP e MCG foram de 0,334; 0,787; 0,679, respectivamente. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, estes atributos foram não significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,065; 0,233 e 0,197, ou seja, de distribuição normal. Porém, os atributos número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV), apresentaram distribuição de frequência do tipo lognormal e indeterminado, respectivamente (Quadro 4). Resultados semelhantes para a PRG, com distribuição de frequência do tipo normal, também foram encontrados por Freddi (2003), Martins (2007) e Megda et al. (2008).

4.1.1.2.2 Atributos do solo

Os atributos DS1, DS3, DP1, DP2, DP3, PT1, PT3, UG1, UG2, UV1, UV2, UV3, MO3, pH2 e o pH3 apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, portanto, as respectivas medidas de tendência central deverão ser representadas pelos valores médios, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,039 e 0,500, assim como negativa entre -0,499 e -0,070. Já os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,106 e 0,829, assim como as negativas entre -0,477 e -0,072, sendo que todos estes coeficientes foram não significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que a respectiva probabilidade variou entre 0,052 e 0,823 (Quadro 4). Dessa forma, a distribuição de frequência do tipo normal, obtida para estes atributos estudados pelo presente, ficou de acordo com os seguintes autores, classificados conforme o atributo: a) DS1 e DS3 (CARVALHO et al., 2003, estudando uma associação Latossolo Vermelho Distrófico + Argissolo Vermelho Distrófico ou eutrófico + Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico sob plantio convencional em uma malha de 1 x 1 m com subtotal de 12 pontos; MESQUITA et al., 2003; SOUZA et al., 2004 e SANTOS et al., 2006), b) DP1, DP2 e DP3 (SANTOS et al., 2006 num Latossolo vermelho Distroférico sob plantio direto e LIMA, 2007, na profundidade de 0,10-0,20 m), c) PT1 e PT3 (CARVALHO et al., 2002b, MESQUITA et al., 2003, SOUZA et al., 2004, MEGDA et al., 2008), d) UG1 e UG2 (SOUZA et al., 1997, quando estudaram uma transeção composta por uma única linha de 50 plantas espaçadas de 4 m, localizada em um pomar de laranja, sob manejo uniforme implantado em um Latossolo Amarelo Distrófico na profundidade de 0-0,20 m e VERONESE JÚNIOR et al., 2006), e) UV1, UV2 e UV3 (MARINS, 2006), quando analisou um Latossolo Escuro Distroférico, numa grade de 100 x 100 m num total de 48 pontos sob plantio direto), f) MO3 (SOUZA et

al., 1998, para o preparo convencional nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,20 m e para o escarificado na profundidade de 0,05-0,20 m em um Argissolo Vermelho Escuro sob cultivo mínimo em uma malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m) e g) pH1 e pH2 (MONTANARI et al., 2008, quando analisaram um Latossolo Vermelho Distrófico e um Argissolo Vermelho Eutrófico sob cultivo de cana-de-açúcar, no qual coletaram-se um total de 53 amostras (3 subamostras para cada ponto amostrado) para o Latossolo, em uma área de 158 ha e 57 amostras (3 subamostras para cada ponto amostrado) para o Argissolo, em uma área de 172 ha, na profundidade de 0-0,50 m).

Os atributos PT2 e pH1 apresentaram distribuição de frequência do tipo log-normal (Quadro 4), concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2007) para o pH na profundidade de 0-0,20 m em um Latossolo Amarelo Distrófico. Já para a PT, discordou dos resultados encontrados por Santos et al., (2006), avaliando um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto em uma malha com 120 pontos e de Megda et al. (2008) que apresentaram em seus estudos distribuição de frequência do tipo normal para a porosidade na profundidade de 0,10-0,20 m. A não normalidade para a porosidade do solo na camada subsuperficial é atribuído devido à profundidade da realização da escarificação que tende a heterogeneizar o terreno.

Em relação à RP3, MO1 e MO2 a distribuição de frequência apresentada foi a do tipo tendendo a normal (Quadro 4). Estes resultados para RP3 discordam de Carvalho et al. (2006) que encontraram distribuição de frequência do tipo normal para a profundidade de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto numa malha de 119 pontos amostrais. Entretanto, os valores de MO1 e MO2 concordam com os obtidos por Corá et al. (2004) e discordam de Souza et al. (1997), no qual foi log-normal.

A distribuição de frequência dos atributos DS2, RP1, RP2, UG3, P1, P2 e P3 foi indeterminada (Quadro 4). Estes resultados discordam de Santos et al. (2006) que encontraram distribuição de frequência do tipo normal para DS2, de Carvalho et al. (2002b) que verificaram distribuição de frequência do tipo log-normal normal para RP1 e RP2, respectivamente, de Santos et al. (2005) no qual a distribuição de frequência encontrada para UG3 foi à do tipo normal e de Souza et al. (1997) e Montanari et al. (2008) que localizaram distribuição de frequência do tipo normal para P1, P2 e P3, mas concorda com Souza et al. (1998) que encontraram para o fósforo na camada de 0,05-0,20 em um Argissolo Vermelho Escuro sob pastagem e em um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto na profundidade de 0,20-0,30 m a distribuição de frequência do tipo indeterminada.

4.1.1.3 Valores médios dos atributos estudados

4.1.1.3.1 Atributos da planta

O valor médio da PRG foi de 2035 kg ha⁻¹ (Quadro 4), ficando perto daquele de Santos et al. (2005), que foi de 2208 kg ha⁻¹. Assim, no presente trabalho ele ficou 240 % acima da produtividade mundial de feijão que foi de 600 kg ha⁻¹ segundo FAO (2007), considerado baixo por ter a cultura um potencial para uma produtividade superior a 3500 kg ha⁻¹ (FNP, 2007). Porém, em regiões que a agricultura é mais tecnificada, como o Estado de São Paulo, a produtividade média já ultrapassa 1200 kg ha⁻¹ (CAMARGO et al., 2001). Já os atributos componentes de produção dados pelo número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP) e a massa de cem grãos (MCG) apresentaram os seguintes valores médios: a) NVP (10,2), b) NGV (5,8), c) NGP (49,5) e d) MCG (23,3 g). Estes resultados corroboram com os de Silva et al. (2008) estudando um Latossolo Vermelho sob cultivo mínimo, que encontrou valores médios de NVP (10,2), NGV (4,0), NGP (44,0) e MCG (23,07 g).

4.1.1.3.2 Atributos do solo

Os valores médios da DS (DS1 de 1,261 kg dm⁻³, DS2 de 1,311 kg dm⁻³ e DS3 de 1,357 kg dm⁻³), PT (PT1 de 0,434 m³ m⁻³, PT2 de 0,400 m³ m⁻³ e PT3 de 0,382 m³ m⁻³), RP (RP1 de 1,096 MPa, RP2 de 2,115 MPa e RP3 de 2,743 MPa), foram distintos em ambas as profundidades (Quadro 4), ocorrendo um aumento das DSs e RPs e diminuição das PTs conforme o aumento da profundidade, corroborando os dados obtidos por Gabriel Filho et al. (2000), que estudando um Latossolo Roxo sob cultivo mínimo, 240 dias após o plantio de mandioca, encontrou valores da DS (DS1 de 1,21 kg dm⁻³, DS2 de 1,17 kg dm⁻³ e DS3 de 1,21 kg dm⁻³) e RP (RP1 de 0,450 MPa, RP2 de 1,602 MPa e RP3 de 2,704 MPa). Eles também indicaram que as camadas estudadas encontravam-se compactadas, tornando-se um fator limitante para máxima expressão da produtividade do feijão, prejudicada tanto pelo deficiente crescimento radicular, assim como pelas conseqüentes deficiências proporcionadas à absorção nutricional. Isso porque, seus valores ficaram aquém daqueles do solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, com 0,50 m³ m⁻³ de porosidade total, conforme preceitos de Kiehl (1979). Oliveira e Moniz (1975) efetuaram o levantamento pedológico detalhado dos solos da Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo, localizada em Ribeirão Preto. Dessa forma, foram relatados, para um Latossolo Vermelho Distroférrico e nas condições de solo virgem sob mata natural, valores da porosidade total e da densidade do solo originados da secção de controle do perfil do solo, respectivamente entre 0,582 a 0,671 m³ m⁻³ e de 0,98 e 1,13 kg dm⁻³.

Bengough et al. (2001) relataram que a condição ideal de umidade do solo, para a coleta dos dados de resistência à penetração, deve ser quando ela estiver variando entre a capacidade de campo e até com um terço a menos de água, isto é, quando o solo ideal, conceituado por Kiehl (1979), apresentar uma umidade volumétrica na microporosidade variando entre 0,33 e 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Portanto, uma vez que o valor médio da capacidade de campo do solo em questão foi de 0,351 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Quadro 2), deve-se salientar que os dados da presente pesquisa foram coletados em ótimas condições de umidade volumétrica do solo, uma vez que foram de 0,262 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV1), 0,289 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV2) e 0,314 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV3) (Quadro 4).

A umidade gravimétrica (Quadro 4) apresentou valores de 0,207 kg kg^{-1} (UG1), de 0,220 kg kg^{-1} (UG2) e de 0,231 kg kg^{-1} (UG3), concordando com os estudos de Carvalho et al. (2002b) e Freddi et al. (2006), que apresentaram aumento destes valores em profundidade do solo. Por outro lado, ficou diretamente relacionada com o aumento da UV, as quais foram de 0,262 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV1), de 0,289 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV2) e de 0,314 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (UV3).

Os valores médios da MO (MO1 de 16,3 g dm^{-3} , MO2 de 15,9 g dm^{-3} e MO3 de 14,7 g dm^{-3}) e do P (P1 de 24 mg dm^{-3} , P2 de 21,2 mg dm^{-3} e P3 de 18,6 mg dm^{-3}) sofreram uma diminuição em profundidade devido ao revolvimento do solo pelo escarificador. Souza et al. (1998), encontrou valores de MO entre 23,5 g dm^{-3} e 27,9 g dm^{-3} e P entre 13 mg dm^{-3} e 47 mg dm^{-3} , variando de forma distinta para as MOs e semelhante com os resultados encontrados na presente pesquisa para os Ps.

4.1.2 Plantio direto

4.1.2.1 Variabilidade dos atributos

4.1.2.1.1 Atributos da planta

No Quadro 5 está apresentada a análise descritiva dos atributos estudados para o plantio direto. A produtividade de grãos do feijão (PRG), o número de vagens por planta (NVP) e o número de grãos por planta (NGP) apresentaram alta variabilidade, com coeficientes de variação de 21%, 28,1% e 28,7%, respectivamente. Portanto, esse dado ficou análogo aos de Freddi et al. (2005) estudando um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto, Martins (2007) e Kitamura et al. (2007) quando analisaram um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto em malhas regulares de 135 pontos amostrais ambas, que também encontraram alta variabilidade de 24% para a produtividade de grãos do feijão. Contudo, discorda de Megda et al. (2008) avaliando um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto, que encontraram valores de média variabilidade (19%). Já o número de grãos por vagem (NGV) apresentou média variabilidade com coeficiente de variação de 13,2%, enquanto a massa de cem grãos (MCG) teve baixa variabilidade 4,5%.

Quadro 5: Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^(b)	
			Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
<i>Atributos da planta</i>										
PRG (kg ha ⁻¹)	2200,9	2206,9	1225,2	3390,0	464,7	21,1	-0,625	0,020	0,217	NO
NVP	11,8	12,0	5,0	22,0	3,320	28,1	0,287	0,371	0,085	NO
NGV	6,1	6,0	5,0	7,0	0,807	13,2	-	-	-	IN
NGP	59,3	58,0	17,0	106,0	17,0	28,7	0,048	0,244	0,547	NO
MCG (g)	24,1	24,1	20,8	27,2	1,073	4,5	0,984	-0,075	0,258	NO
<i>Atributos físicos do solo</i>										
DS1 (kg dm ⁻³)	1,362	1,365	1,120	1,563	0,107	7,9	-0,722	-0,170	0,055	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,413	1,413	1,233	1,563	0,067	4,8	0,176	-0,318	0,237	NO
DS3 (kg dm ⁻³)	1,391	1,394	1,203	1,499	0,059	4,3	0,379	-0,573	0,031	TN
DP1 (kg dm ⁻³)	2,265	2,253	2,040	2,598	0,131	5,8	-0,660	0,306	0,046	TL
DP2 (kg dm ⁻³)	2,263	2,233	1,991	2,681	0,145	6,4	-	-	-	IN
DP3 (kg dm ⁻³)	2,229	2,215	1,839	2,647	0,131	5,9	0,807	0,323	0,119	NO
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,397	0,392	0,253	0,534	0,054	13,7	-0,343	0,090	0,264	NO
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,377	0,335	0,266	0,533	0,053	14,3	-0,204	0,307	0,372	NO
PT3 (m ³ m ⁻³)	0,375	0,380	0,221	0,539	0,050	13,4	0,820	0,004	0,781	NO
RP1 (MPa)	1,563	1,562	0,547	3,702	0,727	46,6	-	-	-	IN
RP2 (MPa)	2,618	2,584	0,701	4,904	0,713	27,2	0,709	0,291	0,129	NO
RP3 (MPa)	3,236	3,190	1,900	5,117	0,619	19,2	0,219	0,108	0,449	TL
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,208	0,210	0,139	0,282	0,029	13,9	-0,116	0,004	0,850	NO
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,211	0,213	0,137	0,281	0,027	13,1	0,318	-0,362	0,094	NO
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,214	0,219	0,128	0,282	0,029	13,6	0,320	-0,415	0,141	NO
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,285	0,285	0,167	0,408	0,050	17,6	-0,026	-0,030	0,739	NO
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,298	0,302	0,201	0,410	0,041	13,9	0,078	-0,024	0,422	NO
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,298	0,302	0,172	0,405	0,041	13,9	0,412	-0,386	0,301	NO
<i>Atributos químicos do solo</i>										
MO1 (g dm ⁻³)	18,3	18,1	13,5	25,4	2,671	14,6	-0,633	0,090	0,017	TL
MO2 (g dm ⁻³)	17,7	16,9	9,1	24,2	3,352	18,9	-	-	-	IN
MO3 (g dm ⁻³)	14,8	14,6	6,9	22,9	3,100	20,8	-0,316	0,094	0,202	NO
P1 (mg dm ⁻³)	20,0	20,0	7,0	40,0	6,557	32,7	-0,160	0,017	0,092	LN
P2 (mg dm ⁻³)	17,0	16,0	4,0	51,0	8,928	52,7	0,115	-0,052	0,403	TL
P3 (mg dm ⁻³)	11,6	10,0	2,0	38,0	7,220	62,4	0,229	-0,043	0,083	LN
pH1 (CaCl ₂)	4,9	4,9	4,2	5,7	0,347	7,0	-0,680	0,347	0,174	NO
pH2 (CaCl ₂)	5,0	5,0	4,3	5,7	0,331	6,6	-0,488	0,051	0,595	NO
pH3 (CaCl ₂)	5,0	5,0	4,3	5,8	0,338	6,7	-0,383	0,036	0,840	NO

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MCG = massa de cem grãos; DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P, pH, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletados nas camadas do solo; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN, TL e IN respectivamente do tipo normal, log-normal, tendendo a normal, tendendo a lognormal e indeterminada.

4.1.2.1.2 Atributos do solo

A variabilidade da densidade do solo (DS), da densidade da partícula (DP) e do potencial hidrogeniônico (pH) nas três camadas de solo estudadas foi baixa, com coeficientes de variação entre 4-8%. Assim, os dados de densidade do solo concordaram com aqueles de Souza et al. (2001), Mesquita et al. (2003), Johann et al. (2004), Santos et al. (2006), Lima et al. (2007) e Rosa Filho (2008), os quais variaram entre 3-10%, quando respectivamente trabalharam com um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob plantio direto, Latossolo Bruno Distrófico subdividido em parcelas sem manejo localizado e parcelas com manejo localizado, Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto, Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto e Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto. Já os dados de densidade da partícula concordaram com os de Lima (2007), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta que foi de 2%. Para os dados de pH resultados semelhantes foram conseguidos por Freddi (2003) e Bezerra (2008), quando trabalharam em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto e Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto, respectivamente, com coeficientes de variação entre 4-7% (Quadro 5).

Para a porosidade total (PT), a umidade gravimétrica (UG) e a umidade volumétrica (UV), todos apresentaram variabilidade média, com coeficientes de variação entre 13-18% (Quadro 5). Os dados de porosidade total, discordam com os de Secco et al. (2005), quando estudaram um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto, nas profundidades de 0-0,07 e de 0,07-0,14 m, de Santos et al. (2006) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto e de Megda et al. (2008) num Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto, nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m, que encontraram baixa variabilidade variando de 4% a 8%. Esses dados, para a umidade gravimétrica concordam com aqueles de Carvalho et al. (2002b), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional nas profundidades de 0-0,05 e de 0,05-0,20 m e Santos et al. (2005), em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional para a UG1. Porém, discorda de Souza et al. (2001), quando trabalharam em um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto que encontraram valores de baixa variabilidade entre 4-6% para as profundidades de 0-0,05 e 0,15-0,20 m, respectivamente, de Veronese Júnior et al. (2006), obtido nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional verificaram valores de 5-10% para UG1, UG2 e UG3 e de Freddi et al. (2006), que estudando um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e de 0,20-0,30 m constataram valores entre 4-10%. Para a

umidade volumétrica estes resultados discordam de Rosa Filho (2008) que estudando um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, verificaram baixa variabilidade, de 6% e 4%.

A matéria orgânica (MO) apresentou-se com média a alta variabilidade, sendo de 14, 19 e 21%, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente (Quadro 5). Esses dados concordaram com aqueles de Bezerra (2008), quando trabalhado em um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto em uma rede de 50 x 50 m, com 125 pontos amostrais, avaliados nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, constataram valores de 26 e 23%, respectivamente em profundidade, sendo considerado como alta variabilidade. Porém, discordaram aos obtidos por Souza et al. (1998), de 9 e 8%, consideradas baixas, nas profundidades 0-0,05 e 0,05-0,20 m, respectivamente, de um Argissolo Vermelho Escuro sob plantio direto em uma malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m. Os mesmos autores avaliando um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m, em uma malha quadrada com 49 pontos (7x7), espaçadas de 10 x 10 m, também encontraram valores de baixa variabilidade (7%, 6% e 9%, respectivamente em profundidade).

Em relação à resistência à penetração (RP), a variabilidade foi muito alta, alta e média, respectivamente nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sendo de 46%, 27% e 19% (Quadro 5). Assim, tais dados de resistência à penetração concordaram com aqueles de Souza et al. (2006), Mercante et al. (2003), Johann et al. (2004) e Freddi et al. (2006), respectivamente de 37% para todas as profundidades de 0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m em um Latossolo Vermelho Distrófico, de 15% obtido num Latossolo Vermelho Distroférico, 16% num Latossolo Bruno Distrófico e de 14% num Latossolo Vermelho Distrófico. Já para o teor de fósforo (P), todos apresentaram muito alta variabilidade (Quadro 5), com coeficientes de variação entre 32 e 62%. Logo para o fósforo, tais resultados concordaram com aqueles de Souza et al. (1998), que foi de 31 e 61%, nas profundidades 0-0,05 e 0,05-0,20 m respectivamente, de um Argissolo Vermelho Escuro sob cultivo mínimo em uma malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m; e daqueles de Bezerra (2008), de 58-52%, quando trabalhado em um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto em uma rede de 50 x 50 m, com 125 pontos amostrais, avaliados nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Estes mesmos autores avaliando um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m, em uma malha quadrada com 49 pontos (7x7), espaçadas de 10 x 10 m, também encontraram valores de muito alta variabilidade (32%, 54% e 109%, respectivamente em profundidade).

4.1.2.2 Distribuição de freqüência dos atributos

4.1.2.2.1 Atributos da planta

Os atributos produtividade de grãos (PRG), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP) e massa de cem grãos (MCG) apresentaram distribuição de freqüência do tipo normal com coeficientes de assimetria positiva para PRG, NVP e NGP, as quais foram respectivamente de 0,020; 0,371 e 0,244 e negativa para MCG que foi de -0,075. Já os coeficientes de curtose positiva para NVP, NGP e MCG foram de 0,287; 0,048 e 0,984, respectivamente. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, estes atributos foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,217; 0,085; 0,547 e 0,258. Porém, o atributo número de grãos por vagem (NGV), apresentou distribuição de freqüência do tipo indeterminado, (Quadro 5). Resultados semelhantes para a PRG de feijão, com distribuição de freqüência do tipo normal, também foram encontrados por Freddi (2003), Martins (2007) e Megda et al. (2008).

4.1.2.2.2 Atributos do solo

Os atributos densidade do solo (DS) para as profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, densidade da partícula (DP) para a profundidade de 0,20-0,30 m, porosidade total (PT) para as três profundidades, resistência à penetração (RP) na profundidade de 0,10-0,20 m, umidade gravimétrica (UG) e umidade volumétrica (UV) para as três profundidades, matéria orgânica (MO) na profundidade de 0,20-0,30 m e potencial hidrogeniônico (pH) para as três profundidades, apresentaram distribuição de freqüência do tipo normal (Quadro 5), portanto, as respectivas medidas de tendência central deverão ser representadas pelos valores médios, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,004 e 0,347, assim como negativa entre -0,415 e -0,024. Já os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,078 e 0,820, assim, como as negativas entre -0,722 e -0,026, sendo que todos estes coeficientes foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que a respectiva probabilidade variou entre 0,055 e 0,850 (Quadro 5). Dessa forma, a distribuição de freqüência do tipo normal, obtida para estes atributos estudados, ficou de acordo com os seguintes autores, classificados conforme o atributo: a) DS1 e DS2 (MESQUITA et al., 2003 em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob plantio direto, SOUZA et al., 2004 num Latossolo Vermelho Eutroférico e SANTOS et al., 2006 num Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto), b) DP3 (SANTOS et al., 2006, na profundidade de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto), c) PT1, PT2 e PT3 (MESQUITA et al., 2003, SOUZA et al., 2004, SANTOS et al., 2006 e MEGDA et al., 2008),

d) UG1, UG2 e UG3 (SOUZA et al., 1997, quando estudaram uma transeção composta por uma única linha de 50 plantas espaçadas de 4 m, localizada em um pomar de laranja, sob manejo uniforme implantado em um Latossolo Amarelo Distrófico na profundidade de 0-0,20 m e VERONESE JÚNIOR et al., 2006), e) UV1, UV2 e UV3 (MARINS, 2006), quando analisou um Latossolo Escuro Distroférico, numa grade de 100 x 100 m num total de 48 pontos sob plantio direto), f) MO3 (SOUZA et al., 1998, sob plantio direto nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,20 m em um de um Argissolo Vermelho Escuro numa malha quadrada com 40 pontos (10x4), espaçadas 1 x 1 m e também para um Latossolo Roxo Distrófico na profundidade de 0,20-0,30 m em um malha quadrada com 49 pontos (7x7), espaçadas de 10 x 10 m) e g) pH1, pH2 e pH3 (CARVALHO et al., 2002a estudando um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico sob plantio direto numa malha quadrada de 49 pontos (7x7), a espaços de 4 x 4 m, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,20 m e Montanari et al. (2008), quando analisaram um Latossolo Vermelho Distrófico e um Argissolo Vermelho Eutrófico sob cultivo de cana-de-açúcar, no qual se coletou um total de 53 amostras (3 subamostras para cada ponto amostrado) para o Latossolo, em uma área de 158 ha e 57 amostras (3 subamostras para cada ponto amostrado) para o Argissolo, em uma área de 172 ha, na profundidade de 0-0,50 m).

Os atributos P1 e P3 apresentaram distribuição de freqüência do tipo log-normal, concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (1998). Em relação à DS3, a distribuição de freqüência apresentada foi a do tipo tendendo a normal. Estes resultados discordam de Santos et al. (2006) que encontraram distribuição de freqüência do tipo normal para a profundidade de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto numa malha de 120 pontos amostrais (Quadro 5).

Quando se avaliou a distribuição de freqüência dos atributos DP1, RP3, MO1 e P2 pôde-se verificar que foi tida como tendendo a lognormal (Quadro 5). Estes resultados discordam de Santos et al. (2006) para DP1, de Silva et al. (2004) em um Latossolo Vermelho Distroférico numa grade de 195 pontos para RP3, de Souza et al. (1998) para MO1 e de Souza et al. (1997) e Montanari et al. (2008) para P2, no qual encontraram distribuição de freqüência do tipo normal.

A distribuição de freqüência indeterminada foi verificada para os atributos DP2, RP1 e MO2 (Quadro 5). Estes resultados discordam de Santos et al. (2006) e Lima (2007) para DP2 e de Silva et al. (2004) para RP1, que encontraram distribuição de freqüência do tipo normal, porém concorda com Bezerra (2008) que encontrou distribuição de freqüência do tipo indeterminada para MO2.

4.1.2.3 Valores médios dos atributos estudados

4.1.2.3.1 Atributos da planta

O valor médio da PRG foi de 2201 kg ha⁻¹ (Quadro 5), ficando próximo daquele obtido por Freddi (2003) e de Santos et al. (2005), que foram de 2594 e 2208 kg ha⁻¹, respectivamente. Assim, no presente trabalho ele ficou 265 % acima da produtividade mundial de feijão que foi de 600 kg ha⁻¹ segundo FAO (2007), considerado baixo por ser uma cultura com potencial para produtividade superior a 3500 kg ha⁻¹ (FNP, 2007). Porém, em regiões que a agricultura é mais tecnificada, como o Estado de São Paulo, a produtividade média já ultrapassa 1200 kg ha⁻¹ (CAMARGO et al., 2001). Já os componentes de produção número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP) massa de cem grãos (MCG), apresentaram os seguintes valores médios: a) NVP (11,8), b) NGV (6,1), c) NGP (59,3) e d) MCG (24,1 g), sendo que estas médias provieram de 117 repetições. Estes resultados discordam dos obtidos por Silva et al. (2008) estudando um Latossolo Vermelho sob plantio direto, que encontraram valores médios inferiores de NVP (7,44), NGV (4,17), NGP (33,67) e MCG (22,95 g), no qual as médias foram calculadas com quatro repetições.

4.1.2.3.2 Atributos do solo

Os valores médios da DS (DS1 de 1,362 kg dm⁻³, DS2 de 1,413 kg dm⁻³ e DS3 de 1,391 kg dm⁻³), PT (PT1 de 0,397 m³ m⁻³, PT2 de 0,377 m³ m⁻³ e PT3 de 0,375 m³ m⁻³), RP (RP1 de 1,563 MPa, RP2 de 2,618 MPa e RP3 de 3,236 MPa), foram distintos em ambas as profundidades (Quadro 5), ocorrendo um aumento das DSs e RPs e diminuição das PTs conforme o aumento da profundidade, discordando com os dados obtidos por Secco et al. (2005), que estudando um Argissolo sob plantio direto, verificaram valores da DS (DS1 de 1,24 kg dm⁻³, DS2 de 1,31 kg dm⁻³ e DS3 de 1,29 kg dm⁻³) e PT (PT1 de 0,52 m³ m⁻³, PT2 de 0,50 m³ m⁻³ e PT3 de 0,50 m³ m⁻³). Eles também indicaram que as camadas estudadas encontravam-se compactadas, tornando-se um fator limitante para máxima expressão da produtividade do feijão, prejudicada tanto pelo deficiente crescimento radicular, assim como pelas conseqüentes deficiências proporcionadas à absorção nutricional. Isso porque, seus valores ficaram aquém daqueles do solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, que é o que apresenta 0,50 m³ m⁻³ de porosidade total, conforme preceitos de Kiehl (1979). Oliveira e Moniz (1975) efetuaram o levantamento pedológico detalhado dos solos da Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo, localizada em Ribeirão Preto. Dessa forma, foram relatados, para um Latossolo Vermelho Distroférico e nas condições de solo virgem sob mata natural, valores da porosidade total e da densidade do solo originados

da secção de controle do perfil do solo, respectivamente entre 0,582 a 0,671 m³ m⁻³ e de 0,98 e 1,13 kg dm⁻³.

Bengough et al. (2001) relataram que a condição ideal de umidade do solo, para a coleta dos dados de resistência à penetração, deve ser quando ela estiver variando entre a capacidade de campo e até com um terço a menos de água, isto é, quando o solo ideal, conceituado por Kiehl (1979), apresentar uma umidade volumétrica na microporosidade variando entre 0,33 e 0,22 m³ m⁻³. Portanto, uma vez que a capacidade de campo do solo em questão, determinada por Martins (2007), foi de 0,351 m³ m⁻³, deve-se salientar que os dados da presente pesquisa foram coletados em ótimas condições de umidade volumétrica do solo (Quadro 5), uma vez que seus valores ficaram entre 0,285 m³ m⁻³ (UV1), 0,298 m³ m⁻³ (UV2 e UV3).

A umidade gravimétrica (Quadro 5) apresentou valores de 0,208 kg kg⁻¹ (UG1), de 0,211 kg kg⁻¹ (UG2) e de 0,214 kg kg⁻¹ (UG3), concordando com os estudos de Carvalho et al. (2002b) e Freddi et al. (2006), que apresentaram aumento destes valores em profundidade do solo. Por outro lado, ficou diretamente relacionada com o aumento da UV.

Os valores médios da MO (MO1 de 18,1 g dm⁻³, MO2 de 17,7 g dm⁻³ e MO3 de 14,8 g dm⁻³) e P (P1 de 20 mg dm⁻³, P2 de 16,0 mg dm⁻³ e P3 de 10,0 mg dm⁻³), sofreram uma diminuição em profundidade. Souza et al. (1998), encontrou valores de MO entre 23,5 g dm⁻³ e 27,9 g dm⁻³ e P entre 13 mg dm⁻³ e 47 mg dm⁻³, variando de forma distinta para Mos e semelhante para Ps com os resultados encontrados na presente pesquisa.

4.1.3 Análise da variabilidade, distribuição de frequência e valores médios entre os tratamentos

Na análise da variabilidade dos atributos, classificada de acordo com o coeficiente de variação, nas classes baixa, média, alta e muito alta (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002), verificou-se que, entre os tratamentos (CM/PD), houve concordância de classes para 81% deles. Assim, apenas para 19% deles não houve tal concordância. Por outro lado, o PD proporcionou, em relação ao CM, maior variabilidade para os atributos da planta, ao passo que, em relação aos do solo, foi menor. Portanto, em relação ao CM, no PD ocorreu um aumento da heterogeneidade dos atributos da planta. Já em relação aos do solo, ocorreu um aumento da homogeneidade.

Quando se estudou a distribuição de frequência observou-se que 56% dos atributos estudados no CM apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, contra 66% no PD. Sugerindo haver, no PD, uma maior tendência à normalidade dos dados. Os atributos que apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, tanto no CM como no PD, foram o

PRG, NGP, MCG, DS1, DP3, PT1, PT3, UG1, UG2, UV1, UV2, UV3, MO3, pH2 e pH3 (Quadro 4 e 5).

Entre o CM e PD, em relação aos valores médios observados para os atributos houve: a) em relação à planta: maiores valores do PRG, NVP, NGV e MCG no sistema plantio direto (PD), ficando apenas o NGP como menor no sistema cultivo mínimo escarificado (CM), b) em relação ao solo: maiores valores do DS1, DS2, DS3, DP1, DP2, DP3, RP1, RP2, RP3, UG1, UV1, UV2, UV3, MO1, MO2, MO3, pH1, pH2 e pH3 no sistema plantio direto (PD), ficando o PT1, PT2, PT3, UG2, UG3, P1, P2 e o P3 como menores no sistema cultivo mínimo escarificado (CM). Portanto, a menor PRG no CM pôde ser devido, provavelmente, às falhas que esse sistema proporciona no solo, deixando bolsões de ar internamente e torrões superficialmente, causando uma redução de germinação e emergência, portanto, redução da população de plantas, repercutindo numa menor produtividade. Por outro lado, os maiores valores da densidade do solo, resistência à penetração e da umidade volumétrica indicaram que o PD, ainda que tenha se apresentado com maior compactação, pôde proporcionar maior produtividade de grãos de feijão.

4.2 Análise da significância estatística entre os atributos do cultivo mínimo e do plantio direto

4.2.1 Atributos da planta

O resultado do teste F da análise da variância para os atributos do feijoeiro, para o cultivo mínimo e plantio direto, mostrou-se significativa para a produtividade de grãos de feijão (PRG) e o número de vagens por planta (NVP), a 5 e 1%, (Quadro 6). Assim, a diferença da PRG, constatada entre o CM e o PD (166, 1 kg ha⁻¹), indica que o sistema plantio direto, ainda que em condições de maior compactação, proporcionou uma maior produtividade de grãos de feijão. As produtividades médias de grãos de feijão ficaram próximas das médias de 2006 e 2007 para o estado de São Paulo que foram de 2156 e 2389 kg ha⁻¹ (IEA, 2008) e para o estado de Minas Gerais que foi de 2084 kg ha⁻¹ na safra 2005 (WANDER, 2005) para o feijão de 3ª safra, também conhecido como feijão de inverno. Contudo, diferiram da produtividade média nacional desde o ano agrícola de 1990/91 até 2006/07 que foi de 1208 kg ha⁻¹ (CONAB, 2007), ou seja, a produtividade do presente estudo foi 60% superior a produtividade média nacional.

A produtividade relativa para o cultivo mínimo e plantio direto foram respectivamente de 92,5 e 100%, ficando próximas das produtividades relativas obtidas em um Latossolo Vermelho sob cultivo mínimo e plantio direto (96 e 100%, respectivamente) verificados por Collares et al. (2008), que também encontraram diferença significativa a 5% de probabilidade

Quadro 6: Teste F aplicado aos atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **cultivo mínimo e plantio direto**

Atributo ⁽¹⁾	F Calculado ⁽²⁾	Valores médios ⁽³⁾	
		Cultivo mínimo	Plantio direto
PRG (kg ha ⁻¹)	1,56*	2034,8 ± 34,4	2200,9 ± 43,0
NVP	2,47**	10,2 ± 0,2	11,8 ± 0,3
NGV	1,20	5,8 ± 0,07	6,1 ± 0,07
NGP	2,02**	49,5 ± 1,1	59,3 ± 1,6
MCG (g)	1,07	23,3 ± 0,10	24,1 ± 0,10
DS1 (kg dm ⁻³)	1,40	1,261 ± 0,012	1,362 ± 0,010
DS2 (kg dm ⁻³)	2,95**	1,311 ± 0,011	1,413 ± 0,006
DS3 (kg dm ⁻³)	1,72**	1,357 ± 0,007	1,391 ± 0,005
DP1 (kg dm ⁻³)	1,15	2,235 ± 0,011	2,265 ± 0,012
DP2 (kg dm ⁻³)	2,09**	2,190 ± 0,009	2,263 ± 0,014
DP3 (kg dm ⁻³)	1,41	2,205 ± 0,010	2,229 ± 0,012
PT1 (m ³ m ⁻³)	1,05	0,434 ± 0,005	0,397 ± 0,005
PT2 (m ³ m ⁻³)	1,03	0,400 ± 0,005	0,377 ± 0,005
PT3 (m ³ m ⁻³)	1,32	0,382 ± 0,004	0,375 ± 0,004
RP1 (MPa)	1,30	1,096 ± 0,060	1,563 ± 0,067
RP2 (MPa)	2,31**	2,115 ± 0,100	2,618 ± 0,066
RP3 (MPa)	2,42**	2,743 ± 0,090	3,236 ± 0,057
UG1 (kg kg ⁻¹)	1,72**	0,207 ± 0,002	0,208 ± 0,002
UG2 (kg kg ⁻¹)	1,52*	0,220 ± 0,021	0,211 ± 0,026
UG3 (kg kg ⁻¹)	2,60**	0,231 ± 0,002	0,214 ± 0,003
UV1 (m ³ m ⁻³)	1,52*	0,262 ± 0,004	0,285 ± 0,005
UV2 (m ³ m ⁻³)	1,08	0,289 ± 0,004	0,298 ± 0,004
UV3 (m ³ m ⁻³)	2,21**	0,314 ± 0,003	0,298 ± 0,004
MO1 (g dm ⁻³)	1,10	16,3 ± 0,3	18,3 ± 0,2
MO2 (g dm ⁻³)	1,65**	15,9 ± 0,2	17,7 ± 0,3
MO3 (g dm ⁻³)	1,18	14,7 ± 0,3	14,8 ± 0,3
P1 (mg dm ⁻³)	2,54**	24,0 ± 1,0	20,0 ± 0,6
P2 (mg dm ⁻³)	1,03	21,2 ± 0,8	17,0 ± 0,8
P3 (mg dm ⁻³)	3,03**	18,6 ± 1,7	11,6 ± 0,7
pH1 (CaCl ₂)	2,97**	4,7 ± 0,02	4,9 ± 0,03
pH2 (CaCl ₂)	2,54**	4,7 ± 0,02	5,0 ± 0,03
pH3 (CaCl ₂)	1,91**	4,8 ± 0,02	5,0 ± 0,03

⁽¹⁾ PRG = produtividade de grãos do feijão; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MCG = massa de cem grãos; DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P, pH, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletados nas camadas do solo; ⁽²⁾ * Significativo a 5%, ** Significativo a 1%; ⁽³⁾ Valores médios ± erro padrão da média.

para a produtividade de grãos do feijão entre os dois tratamentos, cultivo mínimo e plantio direto. Silva et al. (2008) estudando um Latossolo Vermelho encontrou diferenças significativas entre os sistemas cultivo mínimo e plantio direto para os componentes da produção de feijão (NVP, NGV e NGP), já para a PRG e MCG não foi encontrada diferença significativa entre as médias.

4.2.2 Atributos do solo

Quando se aplicou o teste F para os atributos do solo para o cultivo mínimo e plantio direto, verificou-se diferença significativa para 60% dos atributos estudados, os quais foram DS2, DS3, DP2, RP2, RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV3, MO2, P1, P3, pH1, pH2, pH3 com valores de F de 2,95; 1,72; 2,09; 2,31; 2,42; 1,72; 1,52; 2,60; 1,52; 2,21; 1,65; 2,54; 3,03; 2,97; 2,54 e 1,91, sendo todos significativos a 1% de probabilidade, com exceção do UG2 e UV1, que apresentaram diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade (Quadro 6). Collares et al. (2008) estudando um Latossolo Vermelho também encontraram diferença significativa para DS, RP e UV e não encontraram diferença significativa para PT, sendo que o mesmo aconteceu no presente estudo. A escarificação (cultivo mínimo) foi eficiente na diminuição da resistência à penetração até os 0,30 m, sendo sempre menor que o plantio direto. Na porosidade total, não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos estudados porque as necessidades das plantas quanto à porosidade de aeração variam com a espécie vegetal (TAYLOR; GARDNER, 1963). Almeida et al. (2008) estudando um Latossolo sob semeadura direta e preparo convencional não encontraram diferença significativa para DS e UG para as profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40, mas encontraram diferença significativa para RP, MO e pH. Furtado et al. (2008) estudando um Nitossolo Vermelho Distroférico verificaram menores valores de matéria orgânica e pH no plantio direto quando comparado com o cultivo mínimo.

Rheinheimer e Anghinoni (2001), estudando um Latossolo Vermelho distroférico, também encontraram diferença significativa para o P nas profundidades 0-2,5; 2,5-7,5 m quando comparando o sistema plantio direto e o sistema de cultivo convencional. Theodoro et al. (2002) estudando um Latossolo Vermelho Escuro comparando café convencional, café em conversão, café orgânico e mata nativa não encontraram diferença significativa entre os tratamentos estudados para a densidade de partícula na profundidade de 0-0,20 m (Quadro 6).

4.2.3 Comparações entre os tratamentos

Quando se compara o cultivo mínimo com o plantio direto observou-se que 60% dos atributos estudados (solo e planta) apresentam diferença significativa de no mínimo 5% de probabilidade.

4.3 Análise de regressão entre os atributos

4.3.1 Regressão linear simples

4.3.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos

4.3.1.1.1 Cultivo mínimo

Nos Quadros 7, 8, 9 estão apresentadas as matrizes de correlação linear simples entre os atributos do feijão (PRG, NVP, NGV, NGP e MCG) e do solo (DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P e pH) para o cultivo mínimo.

4.3.1.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta

As correlações entre os atributos da planta (Quadro 7) foram significativas para os pares PRG x NVP ($r = 0,271^{**}$), PRG x NGP ($r = 0,429^{**}$), NGV x NVP ($r = 0,741^{**}$), NGP x NVP ($r = 0,654^{**}$) e NGP x NGV ($r = 0,478^{**}$).

4.3.1.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo

A correlação entre a PRG e os atributos do solo (Quadros 7 e 8) apresentou significância exclusivamente para os pares: 1) PRG x DS1 ($r = -0,187^*$), 2) PRG x PT1 ($r = 0,200^*$), 3) PRG x UV1 ($r = -0,198^*$), 4) PRG x MO2 ($r = -0,315^{**}$) e 5) PRG x MO3 ($r = -0,190^*$). O único par que apresentou correlação positiva foi o PRG x PT1, indicando que com o aumento da porosidade total (PT1) na camada de 0-0,10 m, ocorrerá o mesmo com a PRG. Por outro lado, o DS1, UV1, MO2 e MO3 apresentaram correlação negativa com a PRG. No caso da DS1 e UV1, tal correlação negativa pode ser explicada pela provável compactação da camada de 0-0,10 m, o que levaria a uma diminuição da absorção de água e nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente da produtividade vegetal. Já em relação ao DS1, tal correlação com a PRG indicou função decrescente entre causa e efeito. Assim, com a diminuição da DS1 ocorrerá um aumento da PRG, sendo o inverso verdadeiro. Desta forma, esse fato ficou de acordo com Santos et al. (2006), que observaram a mesma tendência para a densidade do solo, quando correlacionada com a produtividade de grãos de milho em um Latossolo Vermelho distroférico.

As correlações entre o número de grãos por vagem (NGV) e os atributos do solo (Quadro 8) apresentaram significância exclusivamente para os pares NGV x UG2 ($r = -0,232^*$) e NGV x P1 ($r = 0,191^*$). Por outro lado, em relação ao número de grãos por planta (NGP), a correlação significativa foi para o par NGP x MO3 ($r = -0,199$).

Quadro 7: Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob cultivo mínimo

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)																
	PRG	NVP	NGV	NGP	MCG	DS1	DS2	DS3	DPI	DP2	DP3	PT1	PT2	PT3	RP1	RP2	RP3
NVP	0,271**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NGV	0,111	0,741**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NGP	0,429**	0,654**	0,478**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MCG	-0,017	-0,057	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS1	-0,187*	0,069	0,128	-0,071	0,144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS2	-0,072	0,112	0,064	-0,018	0,065	0,434**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS3	0,009	-0,006	-0,051	-0,092	-0,011	0,060	0,223*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DP1	0,015	-0,076	-0,004	-0,084	0,025	0,244**	0,116	0,073	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DP2	0,090	-0,027	-0,044	0,009	-0,112	0,038	0,203*	0,158	0,108	-	-	-	-	-	-	-	-
DP3	0,157	0,035	0,121	-0,060	0,039	0,009	-0,047	-0,006	0,014	0,134	-	-	-	-	-	-	-
PT1	0,200*	-0,093	-0,075	0,032	-0,153	-0,785**	-0,278**	-0,089	0,227*	0,020	0,008	-	-	-	-	-	-
PT2	0,130	-0,113	-0,044	0,020	-0,126	-0,329**	-0,749**	-0,102	-0,027	0,275**	0,157	0,339**	-	-	-	-	-
PT3	0,179	0,090	0,165	0,083	-0,041	-0,095	-0,167	-0,664**	0,086	0,042	0,646**	0,095	0,140	-	-	-	-
RP1	0,139	0,036	-0,004	0,099	-0,124	0,103	0,006	-0,067	0,008	0,139	0,150	-0,116	0,051	0,189*	-	-	-
RP2	0,011	0,080	0,091	0,022	-0,117	0,158	0,054	0,042	-0,035	0,045	0,156	-0,136	0,008	0,090	0,607**	-	-
RP3	-0,113	0,088	0,164	0,029	-0,059	0,221*	0,009	0,030	-0,016	-0,051	0,097	-0,184*	-0,010	0,049	0,382**	0,698**	-

(a) PRG, NVP, NGV, NGP e MCG são respectivamente a produtividade de grãos do feijão, número de vagens por planta, número de grãos por planta e a massa de cem grãos; DS, DP, PT e RP, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total e a resistência à penetração, coletadas nas camadas do solo; (b) * Significativo a 5%, Significativo a 1% (continua...)

Quadro 8: Terceiro quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **cultivo mínimo**

(...continuação)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)																
	PRG	NVP	NGV	NGP	MCG	DSI	DS2	DS3	DP1	DP2	DP3	PT1	PT2	PT3	RP1	RP2	RP3
UG1	-0,125	-0,067	-0,106	-0,053	-0,091	0,113	0,073	-0,085	-0,151	0,076	-0,080	-0,213*	-0,035	0,005	0,064	-0,029	-0,016
UG2	-0,051	-0,068	-0,232*	-0,018	0,062	0,064	0,060	0,095	-0,084	0,083	-0,127	-0,183*	-0,095	-0,178	0,143	0,044	0,027
UG3	-0,029	0,086	-0,018	0,044	0,044	0,006	0,033	-0,192*	-0,085	-0,059	0,057	-0,109	-0,122	0,132	0,157	-0,117	-0,204*
UV1	-0,198*	-0,003	0,010	-0,078	0,028	0,733**	0,333**	-0,018	0,054	0,079	-0,044	-0,662**	-0,237*	-0,057	0,110	0,081	0,124
UV2	-0,079	0,028	-0,129	-0,021	0,087	0,337**	0,694**	0,219*	0,014	0,185*	-0,119	-0,312**	-0,553**	-0,243**	0,103	0,063	0,015
UV3	-0,033	0,093	-0,023	0,016	0,033	0,065	0,170	0,428**	-0,147	0,023	0,039	-0,195*	-0,188*	-0,283**	0,113	-0,051	-0,157
MO1	-0,125	-0,065	-0,093	-0,012	0,040	0,106	0,060	0,182*	0,093	-0,020	-0,190*	-0,089	-0,091	-0,206*	-0,159	-0,099	-0,033
MO2	-0,315**	-0,066	-0,044	-0,139	0,023	0,085	0,012	0,213*	-0,026	-0,118	-0,123	-0,115	-0,041	-0,241**	-0,192*	-0,122	-0,033
MO3	-0,190*	-0,114	-0,112	-0,199*	0,084	-0,002	-0,065	0,123	-0,152	-0,104	0,041	-0,096	0,039	-0,075	-0,320**	-0,223*	-0,172
P1	-0,027	0,072	0,191*	-0,023	-0,098	0,232*	0,109	0,249**	0,041	0,204*	0,119	-0,171	-0,006	-0,075	-0,013	0,180	0,240*
P2	-0,005	-0,001	0,125	-0,099	-0,135	0,258**	0,058	0,231*	0,017	0,203*	0,097	-0,207*	0,029	-0,053	-0,044	0,245**	0,290**
P3	-0,122	0,050	0,156	-0,124	-0,081	0,231*	0,182*	0,173	0,007	0,117	0,138	-0,205*	-0,087	-0,030	-0,107	0,154	0,176
pH1	-0,121	-0,120	-0,118	-0,113	-0,073	0,017	-0,014	0,144	0,071	0,135	-0,012	-0,034	0,084	-0,065	-0,223*	-0,102	-0,052
pH2	-0,024	-0,042	-0,092	-0,019	-0,030	0,150	-0,003	0,124	0,029	0,165	0,030	-0,129	0,179	-0,080	-0,077	-0,034	-0,044
pH3	-0,044	-0,054	-0,101	-0,039	-0,093	0,032	-0,059	0,151	-0,109	0,124	0,008	-0,063	0,198*	-0,140	-0,167	-0,068	-0,085

(continua...)

^(a) PRG, NVP, NGV, NGP e MCG são respectivamente a produtividade de grãos do feijão, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número de grãos por planta e a massa de cem grãos; DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P e pH, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletadas nas camadas do solo; ^(b) * Significativo a 5%, ** Significativo a 1%

Quadro 9: Quarto quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob cultivo mínimo

(...continuação)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	UG1	UG2	UG3	UV1	UV2	UV3	MO1	MO2	MO3	P1	P2	P3	pH1	pH2	
UG1	-														
UG2	0,375**	-													
UG3	0,260**	0,189*	-												
UV1	0,755**	0,286**	0,192*	-											
UV2	0,318**	0,757**	0,159	0,429**	-										
UV3	0,187*	0,237*	0,777**	0,181*	0,285**	-									
MO1	-0,151	0,010	-0,178	-0,032	0,044	-0,042	-								
MO2	-0,033	-0,059	-0,023	0,032	-0,046	0,106	0,542**	-							
MO3	-0,071	-0,096	-0,154	-0,047	-0,115	-0,070	0,371**	0,636**	-						
P1	-0,016	-0,129	-0,212*	0,143	-0,027	-0,048	0,253**	0,192*	0,248**	-					
P2	-0,039	-0,186*	-0,285**	0,142	-0,100	-0,129	0,131	0,133	0,265**	0,795**	-				
P3	-0,025	-0,137	-0,114	0,143	0,020	-0,018	0,032	0,103	0,287**	0,636**	0,663**	-			
pH1	0,210*	0,125	0,067	0,152	0,073	0,125	0,187*	0,151	0,159	0,112	0,140	0,165	-		
pH2	0,271**	0,191*	0,076	0,280**	0,137	0,124	0,098	0,107	0,069	0,049	0,054	0,053	0,781**	-	
pH3	0,309**	0,142	0,016	0,235*	0,069	0,096	-0,042	0,072	0,185	0,055	0,081	0,062	0,692**	0,773**	

^(a) UG, UV, MO, P e pH, de 1 a 3, são respectivamente a umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletadas nas camadas do solo; ^(b) * Significativo a 5%, ** Significativo a 1%

4.3.1.1.1.3 Atributos do solo versus atributos do solo

As correlações entre os atributos DS x PT, estabelecidas nas mesmas camadas do solo (Quadro 7) foram todas negativas, de magnitudes altas, assim como significativas. Tal fato está correto, uma vez que a DS foi utilizada no cálculo da PT, conforme estabelecido pela eq. (4). A correlação DS1 x PT1 representou o maior valor do coeficiente de correlação ($r = -0,785^{**}$). A relação inversa entre a DS x PT atestou que com o aumento da densidade do solo ocorrerá uma diminuição da porosidade total, ficando esse fato de acordo com Kiehl (1979), Camargo e Alleoni (1997), Carvalho et al. (1999) e Secco et al. (2005). Já as correlações entre DP x PT, também estabelecidas nas mesmas camadas do solo (Quadro 7) foram todas diretas e significativas, com DP1 x PT1 ($r = 0,227^*$), DP2 x PT2 ($r = 0,275^{**}$) e DP3 x PT3 ($r = 0,646^{**}$). A variação direta entre DP x PT pode inferir que com o aumento da densidade da partícula ocorrerá um aumento da porosidade total, ficando esse fato de acordo com Lima (2007). As correlações entre os pares de atributos (Quadro 8) apresentaram-se quando analisados dois atributos quaisquer dentro da mesma profundidade, com o sinal positivo (correlação direta) ou negativo (correlação indireta) para todas aquelas estabelecidas nas três profundidades. A DS x UV apresentou correlação direta, com os respectivos valores do coeficiente de correlação ($0,733^{**}$ a $0,428^*$), já a PT x UV teve correlação indireta, com coeficientes de correlação de ($-0,662^{**}$ a $-0,283^{**}$), estes resultados concordam com os obtidos por Rosa Filho (2008) que também constataram correlação direta para DS x UV e indireta para PT x UV, com os respectivos valores do coeficiente de correlação ($0,761^{**}$ a $0,206^*$) e ($-0,669^{**}$ a $-0,476^{**}$).

Os pares dos atributos DS3 x MO1 ($r = 0,182^*$) e DS3 x MO2 ($r = 0,213^*$), apresentaram correlações diretas, indicando que com o aumento da matéria orgânica, ocorrerá um incremento na densidade do solo, isso talvez devido ao efeito da escarificação que pôde ter proporcionado uma melhor distribuição da matéria orgânica nas camadas do solo estudadas, aumentando assim a densidade do solo.

Os pares dos atributos DS1 x P1 ($r = 0,232^*$), DP2 x P2 ($r = 0,203^*$), UG1 x UV1 ($r = 0,755^{**}$), UG2 x UV2 ($r = 0,757^{**}$), UG3 x UV3 ($r = 0,777^{**}$), UG1 x pH1 ($r = 0,210^*$), UG2 x pH2 ($r = 0,191^*$), MO1 x P1 ($r = 0,253^{**}$), MO3 x P3 ($r = 0,287^{**}$) e MO1 x pH1 ($r = 0,187^*$), também apresentaram correlações diretas, já os pares dos atributos RP1 x pH1 ($r = -0,223^*$) e UG2 x P2 ($r = -0,186^*$), apresentaram correlações indiretas (Quadros 8 e 9).

4.3.1.1.2 Plantio direto

Nos Quadros 10, 11 e 12 estão apresentadas as matrizes de correlação linear simples entre os atributos do feijão (PRG, NVP, NGV, NGP e MCG) e do solo (DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P e pH) para o plantio direto.

4.3.1.1.2.1 Atributos da planta versus atributos da planta

As correlações entre os atributos da planta (Quadro 10) apresentaram significância positiva para os pares PRG x NVP ($r = 0,297^*$), PRG x NGP ($r = 0,310^{**}$), PRG x MCG ($r = 0,187^*$), NVP x NGV ($r = 0,714^{**}$), NVP x NGP ($r = 0,823^{**}$) e NGV x NGP ($r = 0,550^{**}$), ou seja, se ocorrer um aumento em qualquer dos atributos da planta, ocorrerá também um aumento da produtividade de grãos do feijão.

4.3.1.1.2.2 Atributos da planta versus atributos do solo

A correlação entre os atributos da planta com os do solo (Quadros 10 e 11) apresentou correlação negativa para o par PRG x DP2 ($r = -0,253^{**}$). Já os pares 1) NVP x UG2 ($r = 0,241^{**}$), 2) NVP x UV2 ($r = 0,218^*$), 3) NGV x DP3 ($r = 0,214^*$), 4) NGV x PT1 ($r = 0,233^*$), 5) NGV x PT3 ($r = 0,202^*$), 6) NGV x UG2 ($r = 0,184^*$), 7) NGV x MO3 ($r = 0,182^*$), 8) NGP x UG2 ($r = 0,258^{**}$), 9) NGP x UV2 ($r = 0,267^{**}$) e 10) MCG x P3 ($r = 0,240^{**}$) apresentaram significância direta. Todos os atributos dos componentes da produtividade de grãos de feijão resultaram correlação significativa e positiva com a UG2.

4.3.1.1.2.3 Atributos do solo versus atributos do solo

No geral, as correlações entre os pares de atributos do solo (Quadros 10, 11 e 12), apresentaram-se, quando analisados dois atributos quaisquer dentro da mesma profundidade, com sinal positivo ou negativo para todas aquelas estabelecidas nas três profundidades. Os de correlação direta foram DP1 x PT1 ($r = 0,510^{**}$), DP2 x PT2 ($r = 0,676^{**}$), DP3 x PT3 ($r = 0,723^{**}$), DS1 x UG1 ($r = 0,290^*$), DS1 x UV1 ($r = 0,663^{**}$), DS2 x UV2 ($r = 0,296^{**}$), DS3 x UV3 ($r = 0,206^*$), UG1 x UV1 ($r = 0,906^{**}$), UG2 x UV2 ($r = 0,941^{**}$), UG3 x UV3 ($r = 0,954^{**}$). Também, os pares DS1 x MO1 ($r = 0,226^*$), DS1 x pH1 ($r = 0,182^*$), DP3 x pH3 ($r = 0,183^*$), UG1 x MO1 ($r = 0,250^{**}$), UG3 x MO3 ($r = 0,214^*$), UG1 x pH1 ($r = 0,283^{**}$), UG3 x pH3 ($r = 0,199^*$), UV1 x MO1 ($r = 0,298^{**}$), UV3 x MO3 ($r = 0,208^*$), UV1 x pH1 ($r = 0,307^{**}$), MO2 x P2 ($r = 0,392^{**}$), MO3 x P3 ($r = 0,412^{**}$), MO1 x pH1 ($r = 0,507^{**}$), MO2 x pH2 ($r = 0,579^{**}$), MO3 x pH3 ($r = 0,242^{**}$), P1 x pH1 ($r = 0,295^{**}$) e P2 x pH2 ($r = 0,194^*$) apresentaram correlação direta. Já os de correlação indireta foram o DS1 x PT1 ($r = -0,779^{**}$), DS2 x PT2 ($r = -0,617^{**}$), DS3 x PT3 ($r = -0,470^{**}$), PT1 x UV1 ($r = -0,492^{**}$), PT2 x UV2 ($r = -0,240^{**}$), RP2 x MO2 ($r = -0,388^{**}$), RP1 x pH1 ($r = -0,253^{**}$) e RP2 x pH2 ($r = -0,285^{**}$),

Quadro 10: Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob **plântio direto**

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)															
	PRG	NVP	NGV	NGP	MCG	DS1	DS2	DS3	DPI	DP2	DP3	PT1	PT2	PT3	RPI	RP2
NVP	0,297**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NGV	0,074	0,714**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NGP	0,310**	0,823**	0,550**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MCG	0,187*	-0,017	-0,083	-0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS1	-0,095	-0,016	-0,133	0,050	-0,010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS2	-0,086	-0,027	-0,118	0,058	0,030	0,173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS3	0,057	0,042	-0,003	0,052	-0,010	0,275**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DPI	-0,076	0,106	0,179	0,037	-0,057	0,139	-0,141	-0,046	-	-	-	-	-	-	-	-
DP2	-0,253**	-0,029	0,045	-0,102	0,008	-0,011	-0,030	-0,065	0,215*	-	-	-	-	-	-	-
DP3	0,123	0,135	0,214*	0,119	0,026	0,130	-0,140	0,013	-0,099	-0,013	-	-	-	-	-	-
PT1	0,026	0,086	0,233*	-0,020	-0,031	-0,779**	-0,240**	-0,004	0,510**	0,139	-0,177	-	-	-	-	-
PT2	-0,125	-0,053	0,054	-0,174	0,004	-0,135	-0,617**	-0,191*	0,237*	0,676**	0,169	0,264**	-	-	-	-
PT3	0,066	0,089	0,202*	0,022	-0,028	0,090	-0,275**	-0,470**	-0,047	0,092	0,723**	-0,108	0,275**	-	-	-
RPI	-0,021	-0,024	0,040	0,044	0,030	0,160	0,051	-0,020	0,098	-0,137	-0,012	-0,069	-0,101	-0,054	-	-
RP2	-0,016	-0,014	0,013	-0,040	-0,001	0,069	0,269**	0,051	-0,045	-0,006	-0,010	-0,087	-0,145	-0,066	0,477**	-
RP3	-0,008	0,102	0,087	0,068	0,000	-0,206*	0,210*	0,112	-0,036	0,061	-0,100	0,152	-0,079	-0,132	0,152	0,297**

(a) PRG, NVP, NGV, NGP e MCG são respectivamente a produtividade de grãos do feijão, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número de grãos por planta e a massa de cem grãos; DS, DP, PT e RP, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total e a resistência à penetração, coletadas nas camadas do solo, ^(b) * Significativo a 5%, ** Significativo a 1% (continua...)

Quadro 11: Terceiro quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob **plântio direto** (...continuação)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)																
	PRG	NVP	NGV	NGP	MCG	DS1	DS2	DS3	DP1	DP2	DP3	PT1	PT2	PT3	RP1	RP2	RP3
UG1	-0,117	0,093	0,145	0,091	0,014	0,290**	-0,154	-0,030	0,094	0,079	0,228*	-0,195*	0,061	0,167	-0,111	-0,271**	-0,282**
UG2	0,088	0,241**	0,184*	0,258**	-0,159	-0,010	-0,043	-0,027	0,029	-0,120	0,027	0,037	-0,029	0,037	0,050	-0,124	-0,101
UG3	0,008	0,025	0,099	0,046	-0,084	0,016	-0,068	-0,095	0,176	0,145	0,047	0,093	0,165	0,042	-0,010	-0,221*	-0,092
UV1	-0,129	0,070	0,047	0,093	0,004	0,663**	-0,040	-0,033	0,135	0,053	0,231*	-0,492**	-0,018	0,162	-0,023	-0,181*	-0,308**
UV2	0,059	0,218*	0,133	0,267**	-0,141	0,052	0,296**	0,072	-0,023	-0,129	-0,028	-0,050	-0,240**	-0,065	0,066	-0,026	-0,023
UV3	0,022	0,035	0,092	0,057	-0,087	0,006	0,012	0,206*	0,156	0,129	0,047	0,088	0,111	-0,100	-0,014	-0,203*	-0,058
MO1	-0,031	0,025	-0,054	0,050	-0,021	0,226*	0,061	0,260**	0,113	0,087	0,119	-0,129	0,026	0,004	-0,123	-0,233*	-0,164
MO2	0,037	0,131	0,091	0,076	0,045	0,203*	-0,057	0,153	0,129	0,088	0,040	-0,102	0,086	0,043	-0,224*	-0,388**	-0,106
MO3	0,006	0,176	0,182*	0,135	0,121	-0,140	-0,131	-0,013	0,050	0,111	0,062	0,152	0,173	0,111	-0,263**	-0,291**	-0,052
P1	-0,116	0,069	0,111	-0,022	0,055	-0,084	-0,035	0,052	-0,069	-0,067	0,043	0,028	0,020	-0,025	-0,161	-0,120	0,031
P2	0,103	0,040	0,049	0,082	0,109	-0,033	-0,005	0,126	0,084	0,083	0,068	0,078	0,134	-0,023	-0,103	-0,148	-0,088
P3	0,062	0,021	0,034	-0,034	0,240**	-0,074	-0,049	0,089	-0,019	-0,219*	-0,007	0,056	-0,022	-0,040	-0,015	-0,098	-0,033
pH1	0,069	0,097	0,030	0,060	-0,078	0,182*	-0,092	0,052	0,128	-0,084	0,195*	-0,077	-0,046	0,133	-0,253**	-0,229*	-0,209*
pH2	-0,050	0,067	0,030	0,011	-0,123	0,263**	-0,112	-0,010	0,166	-0,036	0,141	-0,123	-0,037	0,113	-0,244**	-0,285**	-0,182*
pH3	-0,022	0,072	0,057	-0,035	-0,085	0,281**	-0,126	-0,090	0,164	-0,064	0,183*	-0,139	-0,071	0,138	-0,181*	-0,219*	-0,092

(a) PRG, NVP, NGV, NGP e MCG são respectivamente a produtividade de grãos do feijão, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número de grãos por planta e a massa de cem grãos; DS, DP, PT, RP, UG, UV, MO, P e pH, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletadas nas camadas do solo; (b) * Significativo a 5%, ** Significativo a 1% (continua...)

Quadro 12: Quarto quadrante da matriz de correlação linear simples entre alguns atributos de um Latossolo Vermelho
Distroférrico sob **plântio direto**

(...continuação)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)													
	UG1	UG2	UG3	UV1	UV2	UV3	MO1	MO2	MO3	P1	P2	P3	pH1	pH2
UG1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	-0,011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG3	0,313**	0,051	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV1	0,906**	-0,010	0,254**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV2	-0,065	0,941**	0,028	-0,024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV3	0,302**	0,047	0,954**	0,242**	0,052	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO1	0,250**	0,011	0,250**	0,298**	0,032	0,326**	-	-	-	-	-	-	-	-
MO2	0,310**	0,099	0,269**	0,333**	0,072	0,312**	0,657**	-	-	-	-	-	-	-
MO3	0,209*	0,151	0,214*	0,106	0,092	0,208*	0,264**	0,533**	-	-	-	-	-	-
P1	0,009	0,309**	-0,034	-0,026	0,280**	-0,014	0,164	0,158	0,151	-	-	-	-	-
P2	0,081	0,150	0,153	0,049	0,136	0,191	0,327**	0,392**	0,286**	0,324**	-	-	-	-
P3	0,004	0,115	0,051	-0,020	0,090	0,074	0,114	0,274**	0,412**	0,259**	0,410**	-	-	-
pH1	0,283**	0,127	0,198*	0,307**	0,091	0,214*	0,507**	0,496**	0,164	0,295**	0,258**	0,205*	-	-
pH2	0,346**	0,146	0,164	0,390**	0,105	0,161	0,467**	0,579**	0,268**	0,272**	0,194*	0,156	0,857**	-
pH3	0,359**	0,127	0,199*	0,413**	0,080	0,171	0,369**	0,517**	0,242**	0,244**	0,133	0,166	0,740**	0,872**

^(a) UG, UV, MO, P e pH, de 1 a 3, são respectivamente a umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, fósforo e o potencial hidrogeniônico, coletadas nas camadas do solo; ^(b) * Significativo a 5%, ** Significativo a 1%

sendo que a correlação inversa entre o par RP x pH é devida, provavelmente, à compactação que, além de afetar a disponibilidade de água, também afeta a disponibilidade dos nutrientes como o fósforo, podendo provocar o aparecimento do Al^{3+} trocável, por abaixamento do pH, por ação talvez do ácido carbônico dissociado, em solo com baixa difusão do ar e consequentemente baixa redução da concentração de CO_2 (PRIMAVESI, 1982).

4.3.1.2 Regressão linear simples entre os atributos

4.3.1.2.1 Cultivo mínimo

As principais equações de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, no âmbito das correlações estabelecidas entre planta *versus* planta e planta *versus* solo para o cultivo mínimo, estão apresentadas no Quadro 13 e nas Figuras 10 e 11. Portanto, os modelos foram exclusivamente apresentados para os pares de atributos que proporcionaram correlações significativas, assim como também apresentaram coeficientes adjuntos significativos para as variáveis independentes.

No âmbito da correlação entre atributos da planta *versus* planta (Quadro 13) foi observado: a) a equação de regressão da PRG em função da NVP foi representada por um modelo potencial (Eq. 14; Fig. 10a), com um baixo, entretanto, significativo, coeficiente de correlação ($r = 0,248^{**}$). Seu baixo valor foi dado pelo elevado número de observações utilizado na presente pesquisa ($n=117$). Portanto, a variação da produtividade de grãos do feijão (PRG) em questão pôde ser explicada por apenas 24,8 % da variação dos dados do número de vagens por planta (NVP). Dessa forma, quando o NVP variar entre 6 a 16, a PRG aumentará de 1764 a 2286 $kg\ ha^{-1}$. Já quando tomado o valor médio de 10,2 do NVP poderá ser estimada a PRG média de 2014 $kg\ ha^{-1}$; b) a PRG apresentou uma variação exponencial direta com o NGP (Eq. 15; Fig. 10b). Assim, quando o NGP for inferior a 30 os valores da PRG serão menores que a produtividade média nacional estabelecida para o ano agrícola 2006/07, que foi de 1208 $kg\ ha^{-1}$ (CONAB, 2007).

No âmbito da correlação dos atributos da planta *versus* solo (Quadro 13) houve significativas regressões da PRG em função da DS1, PT1, UV1, MO2 e do MO3 (Figura 11a,b,c,d,e). Foi verificado que: a) a PRG apresentou uma variação exponencial indireta com a DS1 (Quadro 13, Fig. 11a). Portanto, quando ocorrer o mínimo valor da DS1 (0,921 $kg\ dm^{-3}$) implicará num valor máximo estimado da PRG igual a 2202 $kg\ ha^{-1}$. Assim, para o máximo da DS1 (1,574 $kg\ dm^{-3}$), o valor mínimo da PRG de 1833 $kg\ ha^{-1}$, b) a PRG apresentou uma variação exponencial direta com a PT1 (Quadro 13, Fig. 11b). Assim, quando ocorrer o máximo valor da PT1 (0,544 $m^3\ m^{-3}$) implicará num valor máximo da PRG igual a 2153 $kg\ ha^{-1}$; c) a PRG apresentou uma variação potencial indireta com a UV1 (Quadro 13, Fig. 11c).

Quadro 13: Equações e coeficientes da regressão entre atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob **cultivo mínimo**

Modelo matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					Número da equação
	a	b	c	r	r ²	
<i>Planta x planta</i>						
$PRG = a \cdot NVP^b$	1,130.10 ³	2,487.10 ^{-1**}	-	0,2487**	-	(14)
$PRG = a \cdot \exp^{NGP.b}$	1,413.10 ³	7,044.10 ^{-3**}	-	0,4603**	-	(15)
$NGP = a \cdot \exp^{NVP.b}$	2,160.10	7,778.10 ^{-2**}	-	0,5103**	-	(16)
$NVP = a + b \cdot NGP + c \cdot NGP^2$	8,479	-6,379.10 ^{-2NS}	1,862.10 ^{-3**}	-	0,4695**	(17)
$NGP = a + b \cdot NGV$	3,573	7,782**	-	0,4781**	-	(18)
$NGV = a + b \cdot NGP + c \cdot NGP^2$	6,020	-4,147.10 ^{-2NS}	7,440.10 ^{-4**}	-	0,2828**	(19)
<i>Planta x solo</i>						
$PRG = a \cdot \exp^{DS1.b}$	2,851.10 ³	-2,804.10 ^{-1*}	-	-0,1950*	-	(20)
$PRG = a \cdot \exp^{PT1.b}$	1,492.10 ³	6,746.10 ^{-1*}	-	0,2065*	-	(21)
$PRG = a \cdot UV1^b$	1,441.10 ³	-2,434.10 ^{-1*}	-	-0,2064*	-	(22)
$PRG = a \cdot \exp^{MO2.b}$	2,872.10 ³	-2,276.10 ^{-2**}	-	-0,3243**	-	(23)
$PRG = a \cdot \exp^{MO3.b}$	2,345.10 ³	-1,075.10 ^{-2*}	-	-0,1976*	-	(24)

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; DS, PT, UV e MO, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, porosidade total, umidade volumétrica e a matéria orgânica, coletadas nas camadas do solo; ^(b)** significativo a 1%, * significativo a 5%

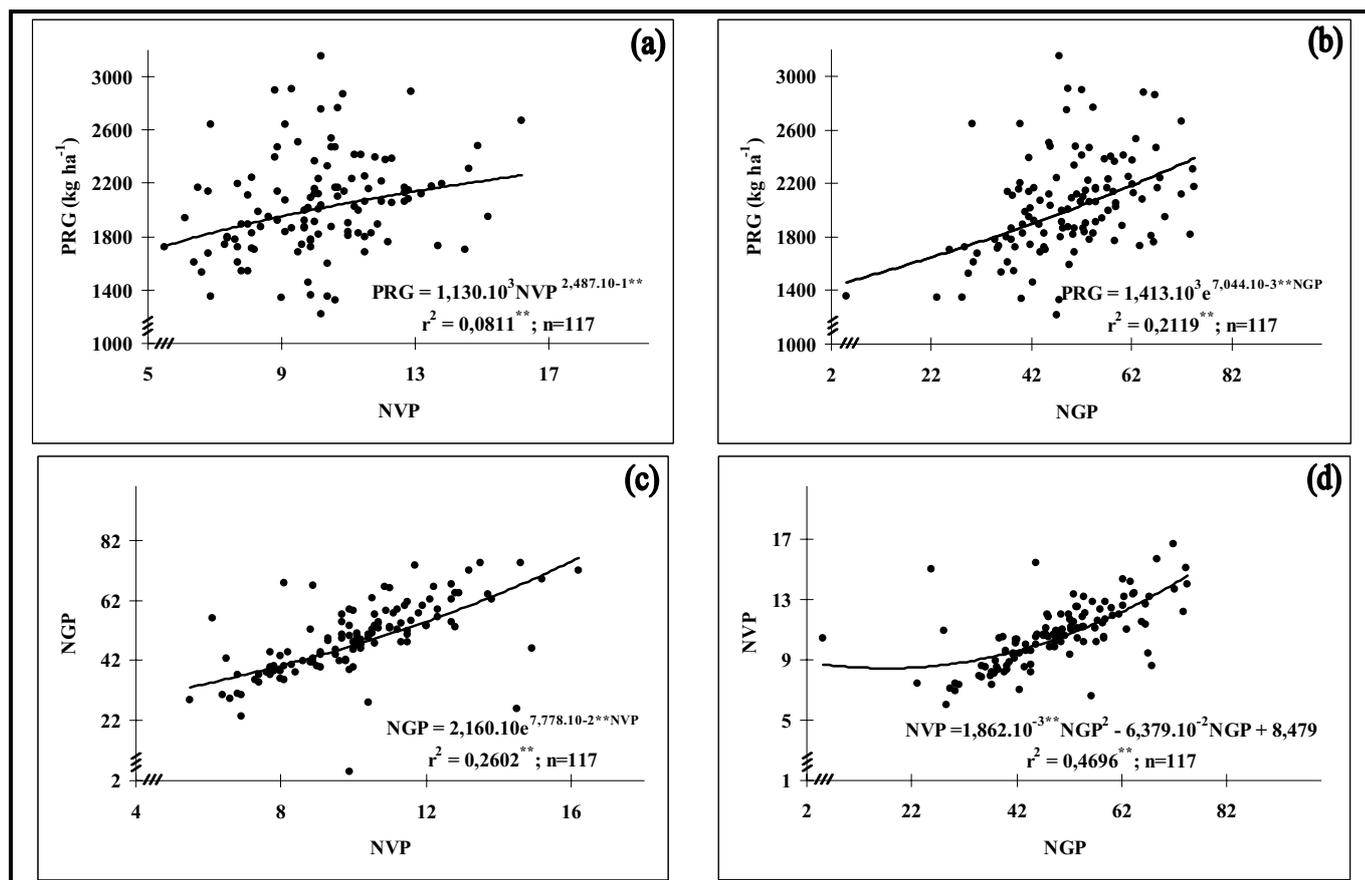


Figura 10: Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro sob **cultivo mínimo**

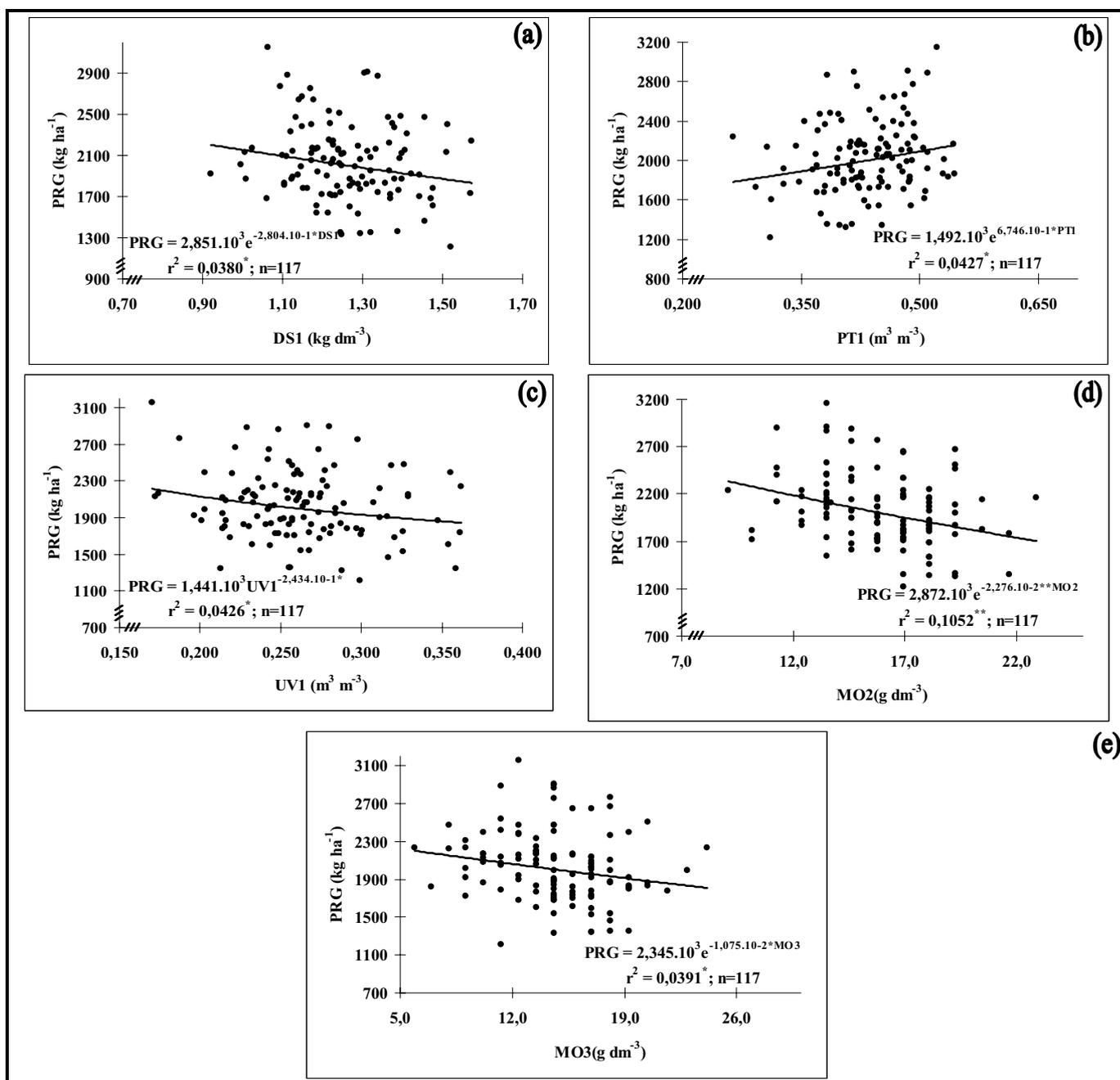


Figura 11: Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **cultivo mínimo**

Portanto, quando ocorrer o mínimo valor da UV1 ($0,170 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) implicará no máximo estimado da PRG, igual a 2217 kg ha^{-1} ; d) a PRG apresentou uma variação exponencial indireta com a MO2 e MO3 (Quadro 13, Figs. 11d,e). Assim, quando ocorrer o máximo valor da MO2 ($22,9 \text{ g dm}^{-3}$) e da MO3 ($24,2 \text{ g dm}^{-3}$) implicará nos mínimos estimados da PRG (1526 e 1807 kg ha^{-1}).

4.3.1.2.2 Plantio direto

As principais equações de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, no âmbito das correlações estabelecidas entre planta *versus* planta e planta *versus* solo para o plantio direto, estão apresentadas no Quadro 14 e na Figura 12. Portanto, os modelos foram exclusivamente apresentados para os pares de atributos que proporcionaram correlações significativas, assim como também apresentaram coeficientes adjuntos significativos para as variáveis independentes.

No âmbito da correlação entre atributos da planta *versus* planta (Quadro 14) foi verificado: a) houve significativas regressões da PRG em função do NVP e do NGP, representadas por um modelo potencial direto (Eq. 25, 26; Fig. 12a,b), com valores do coeficiente de correlação respectivamente de $0,333^{**}$ e $0,353^{**}$. Seus baixos valores foram dados pelo elevado número de observações utilizado na presente pesquisa ($n=117$). Portanto, a variação da produtividade de grãos do feijão (PRG) em questão pôde ser explicada por apenas 33,3 % da variação dos dados do número de vagens por planta (NVP) e por 35,3 % da variação dos dados do número de grãos por planta (NGP). Dessa forma, quando a NVP variar entre 5 a 22, a PRG aumentará de 1760 a 2527 kg ha^{-1} . Já o NGP quando variar entre 17 a 106, a PRG aumentará de 1597 a 2504 kg ha^{-1} . Quando as médias de NVP e NGP forem iguais a 11,8 e 59,3 as PRGs estimadas serão de 2171 e 2175 kg ha^{-1} ; b) a PRG apresentou uma regressão linear direta com a MCG (Eq. 27; Fig. 12c), sendo que quando a MCG resultar um valor médio de $24,1 \text{ g}$, a PRG estimada será de $2202,3 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo maior que a produtividade média nacional para o ano agrícola 2006/07 que foi de 1208 kg ha^{-1} (CONAB, 2007).

No âmbito da correlação entre atributos da planta *versus* solo, a equação de regressão da PRG em função da DP2 (Eq. 34; Fig. 12d) foi representada por um modelo potencial indireto, ou seja, quando os valores da DP2 atingirem seu valor mínimo ($1,991 \text{ kg dm}^{-3}$) a PRG máxima estimada será de 2441 kg ha^{-1} .

4.3.2 Comparações entre tratamentos

Tanto para o CM quanto para o PD, as equações de regressão $PRG=f(NVP)$ e $PRG=f(NGP)$ resultaram uma relação direta entre causa e efeito. Assim, havendo aumento tanto do NVP como do NGP ocorrerá o mesmo com a PRG. Já entre atributos da planta

Quadro 14: Equações e coeficientes da regressão entre atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

Modelo matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					Número da equação
	a	b	c	r	r ²	
<i>Planta x planta</i>						
$PRG = a \cdot NVP^b$	1,189.10 ³	2,440.10 ^{-1**}	-	0,3333**	-	(25)
$PRG = a \cdot NGP^b$	7,979.10 ²	2,455.10 ^{-1**}	-	0,3528**	-	(26)
$PRG = a + b \cdot MCG$	2,463.10 ²	8,115.10 [*]	-	0,1847 [*]	-	(27)
$NGV = a + b \cdot NVP + c \cdot NVP^2$	2,501	4,479.10 ^{-1**}	-1,114.10 ^{-2**}	-	0,5575**	(28)
$NVP = a \cdot NGV^b$	6,085.10 ⁻¹	1,622 ^{**}	-	0,7325**	-	(29)
$NGP = a \cdot NVP^b$	6,617	8,846.10 ^{-1**}	-	0,8410**	-	(30)
$NVP = a \cdot NGP^b$	4,487.10 ⁻¹	7,996.10 ^{-1**}	-	0,8410**	-	(31)
$NGP = a \cdot \exp^{NGV \cdot b}$	1,424.10	2,255.10 ^{-1**}	-	0,5782 [*]	-	(32)
$NGV = a + b \cdot NGP + c \cdot NGP^2$	2,818	8,813.10 ^{-2**}	-5,100.10 ^{-4**}	-	0,3671**	(33)
<i>Planta x solo</i>						
$PRG = a \cdot DP2^b$	4,494.10 ³	-9,047.10 ^{-1**}	-	-0,2592**	-	(34)

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MCG = massa de cem grãos; DP2 é a densidade da partícula da camada de 0,10-0,20 m; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%

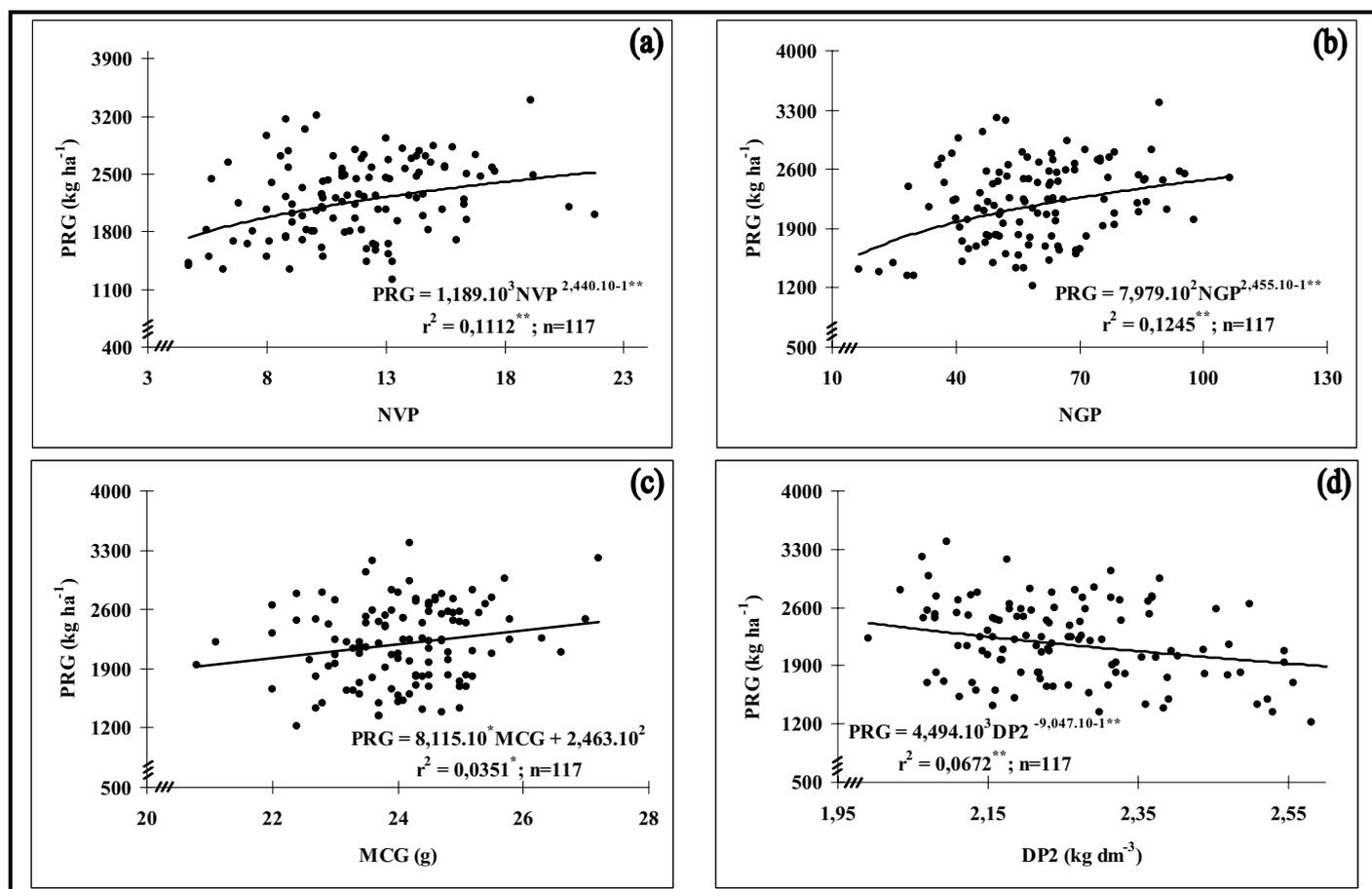


Figura 12: Equação de regressão entre atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

versus solo, a PRG apresentou equação de regressão com a DS1, PT1, UV1, MO2 e MO3 para o cultivo mínimo, enquanto que, para o plantio direto, somente com o DP2.

4.4 Análise geoestatística dos atributos estudados

4.4.1 Análise semivariográfica simples

4.4.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

4.4.1.1.1 Cultivo mínimo

Nos Quadros 15 e 16 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade do feijão e de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) sob cultivo mínimo. Já nas Figuras 13, 14, 15 e 16 foram apresentados seus respectivos semivariogramas. Assim, ficou atestado que, com exceção da #PRG, NVP, NGV, #NGP, MCG, DS1, DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, #RP1, UG1, #UV1, MO1, MO2, #MO3, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial. No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) pH1 (0,979), 2) UV3 (0,965), 3) RP2 (0,964), 4) #P1 (0,945), 5) #P3 (0,938), 6) UG3 (0,929), 7) pH3 (0,907), 8) #P2 (0,887), 9) UG2 (0,853), 10) DS2 (0,842), 11) pH2 (0,826), 12) RP3 (0,743), 13) #DS3 (0,678) e 14) UV2 (0,579). Assim, em relação aos três primeiros (pH1, UV3 e RP2), que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se o seguinte, conforme relatado em sequência.

Para o primeiro caso (pH1), seu valor do r^2 (0,979) indicou ser tal atributo o de melhor ajuste semivariográfico, concordando com aqueles observados por Freddi (2003), quando trabalhando com o sistema de preparo convencional do solo, obtendo-o com o valor de 0,991. Em relação ao ADE, a forte dependência verificada (ADE=84,2%) e o modelo esférico modelado também concordaram com o referido autor, no qual o ADE observado foi de 91,2%. Também o alcance do pH1 do presente (16,5 m) foi menor do que aquele do citado autor, que foi de 51,2 m (Quadro 15 e 16).

Para o segundo (UV3), seu valor do r^2 (0,965), que indicou ser tal atributo o segundo de melhor ajuste semivariográfico, discordou daquele verificado por Martins (2007), que foi de 0,488. Em relação ao ADE, o elevado valor (89,2%) concordou com Martins (2007), no qual foi de 85,8%. Também o modelo exponencial ajustado para a UV3 assemelhou-se com constatado por Martins (2007). O alcance do UV3 do presente (7,2 m) foi menor do que aquele do citado autor, de 22,8 m (Quadro 15 e 16).

Para o terceiro (RP2), seu valor do r^2 (0,964), que indicou ser tal atributo o terceiro de melhor ajuste semivariográfico, concordou com aquele verificado por Santos et al. (2005), no

Quadro 15: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo

Parâmetros								
Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	Avaliador da dependência espacial	
							ADE ^(d)	Classe
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>								
#PRG (kg ha ⁻¹)	epp	1,163.10 ⁵	1,163.10 ⁵	-	-	-	-	-
NVP	epp	4,382	4,382	-	-	-	-	-
NGV	epp	5,410.10 ⁻¹	5,410.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
#NGP	epp	1,041.10 ²	1,041.10 ²	-	-	-	-	-
MCG	epp	1,121	1,121	-	-	-	-	-
<i>γ(h) simples dos atributos físicos do solo</i>								
DS1 (kg dm ⁻³)	epp	1,552.10 ⁻¹	1,552.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
DS2 (kg dm ⁻³)	exp (44)	7,600.10 ⁻⁴	8,250.10 ⁻³	9,8	0,842	3,540.10 ⁻⁶	90,8	forte
#DS3 (kg dm ⁻³)	esf (50)	1,998.10 ⁻³	4,736.10 ⁻³	6,6	0,678	1,448.10 ⁻⁶	57,8	moderada
DP1 (kg dm ⁻³)	epp	1,270.10 ⁻¹	1,270.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
DP2 (kg dm ⁻³)	epp	1,004.10 ⁻¹	1,004.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
DP3 (kg dm ⁻³)	epp	1,182.10 ⁻¹	1,182.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
PT1 (m ³ m ⁻³)	epp	3,164.10 ⁻²	3,164.10 ⁻²	-	-	-	-	-
PT2 (m ³ m ⁻³)	epp	2,779.10 ⁻²	2,779.10 ⁻²	-	-	-	-	-
PT3 (m ³ m ⁻³)	epp	1,958.10 ⁻²	1,958.10 ⁻²	-	-	-	-	-
#RP1 (MPa)	epp	3,114.10 ⁻¹	3,114.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
RP2 (MPa)	esf (44)	1,440.10 ⁻¹	1,132	7,7	0,964	1,510.10 ⁻²	87,3	forte
RP3 (MPa)	exp (51)	3,297.10 ⁻¹	7,200.10 ⁻¹	14,7	0,743	1,920.10 ⁻²	54,2	moderada

(continua...)

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão, NVP = número de vagens por planta, NGV = número de grãos por vagem, NGP = número de grãos por planta, MCG = massa de cem grãos, DS = densidade do solo, DP = densidade da partícula, PT = porosidade total, RP = resistência à penetração; atributo precedido por # identifica resíduo dos dados; ^(b) exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Quadro 16: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **cultivo mínimo**

(...continuação)

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Parâmetros					Avaliador da dependência espacial	
		Efeito		Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	Classe
		Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)					
<i>γ(h) simples dos atributos físicos do solo</i>								
UG1 (kg kg ⁻¹)	epp	5,180.10 ⁻³	5,180.10 ⁻³	-	-	-	-	-
UG2 (kg kg ⁻¹)	exp (48)	4,900.10 ⁻⁵	3,970.10 ⁻⁴	11,1	0,853	7,045.10 ⁻⁹	87,1	forte
UG3 (kg kg ⁻¹)	exp (102)	1,720.10 ⁻⁴	3,550.10 ⁻⁴	25,6	0,929	1,364.10 ⁻⁹	51,4	moderada
#UV1 (m ³ m ⁻³)	epp	1,195.10 ⁻³	1,195.10 ⁻³	-	-	-	-	-
UV2 (m ³ m ⁻³)	exp (58)	9,240.10 ⁻⁴	1,536.10 ⁻³	7,7	0,579	8,306.10 ⁻⁸	39,8	moderada
UV3 (m ³ m ⁻³)	exp (49)	8,000.10 ⁻⁵	7,410.10 ⁻⁴	7,2	0,965	3,934.10 ⁻⁹	89,2	forte
<i>γ(h) simples dos atributos químicos do solo</i>								
MO1 (g dm ⁻³)	epp	7,866	7,866	-	-	-	-	-
MO2 (g dm ⁻³)	epp	6,805	6,805	-	-	-	-	-
#MO3 (g dm ⁻³)	epp	9,066	9,066	-	-	-	-	-
#P1 (mg dm ⁻³)	exp (58)	2,950.10	3,518.10	23,0	0,945	4,010.10	54,4	moderada
#P2 (mg dm ⁻³)	esf (102)	2,140.10	6,708.10	20,4	0,887	1,990.10 ²	68,1	moderada
#P3 (mg dm ⁻³)	esf (58)	5,130.10	1,394.10 ²	35,4	0,938	2,660.10 ²	63,2	moderada
pH1 (CaCl ₂)	esf (92)	6,600.10 ⁻³	4,190.10 ⁻³	16,5	0,979	1,622.10 ⁻⁵	84,2	forte
pH2 (CaCl ₂)	esf (94)	1,598.10 ⁻²	4,386.10 ⁻²	13,8	0,826	9,800.10 ⁻⁵	63,6	moderada
pH3 (CaCl ₂)	esf (58)	3,090.10 ⁻²	6,370.10 ⁻²	15,7	0,907	8,959.10 ⁻⁵	51,5	moderada

^(a) UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, MO = matéria orgânica, P = fósforo, pH = potencial hidrogeniônico; atributo precedido por # identifica resíduo dos dados; ^(b) exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

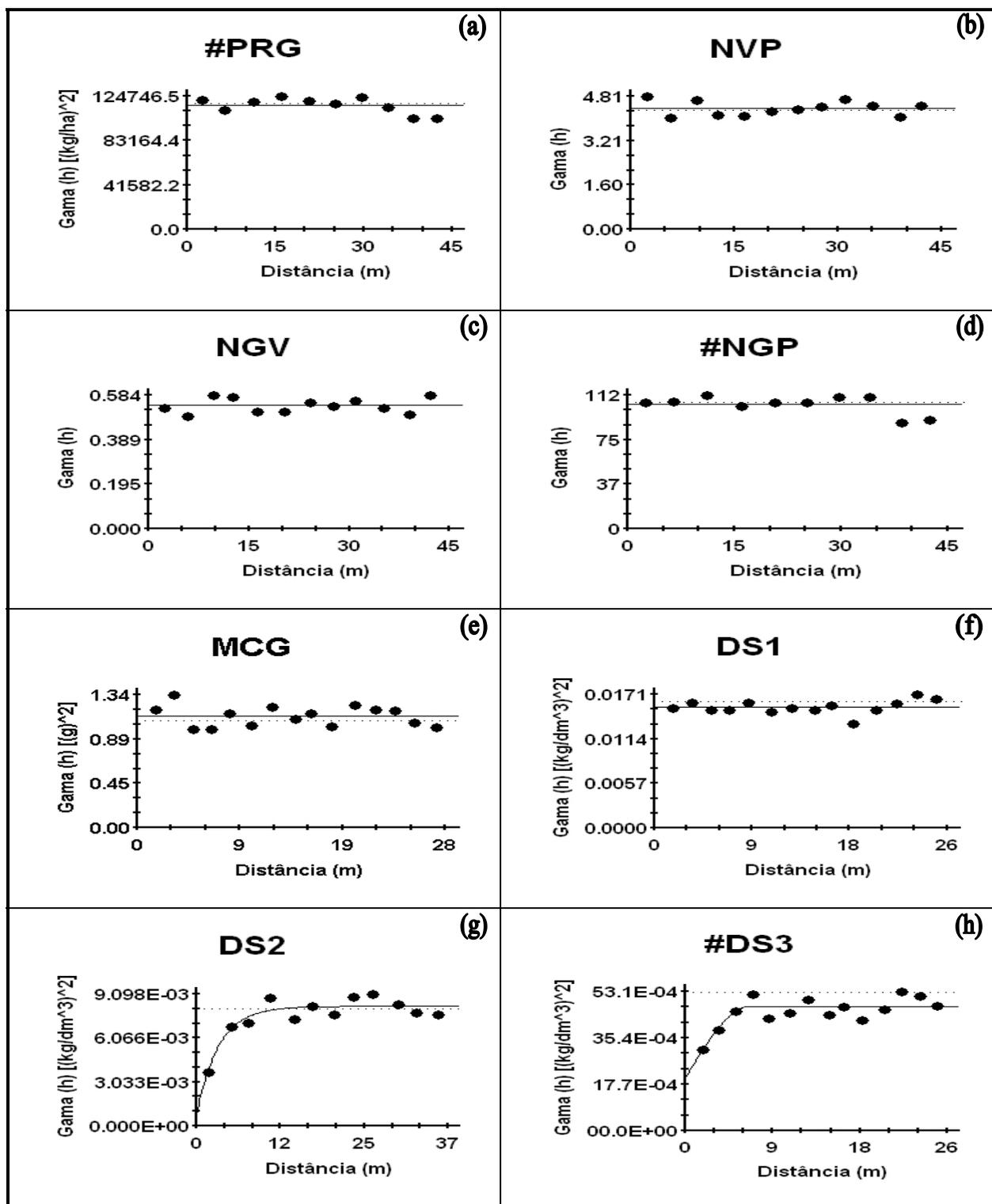


Figura 13: Semivariogramas simples dos atributos da produtividade do feijão (#PRG, NVP, NGV, #NGP, MCG) e de um Latossolo Vermelho Distroferrico (DS1, DS2 e #DS3) sob **cultivo mínimo**

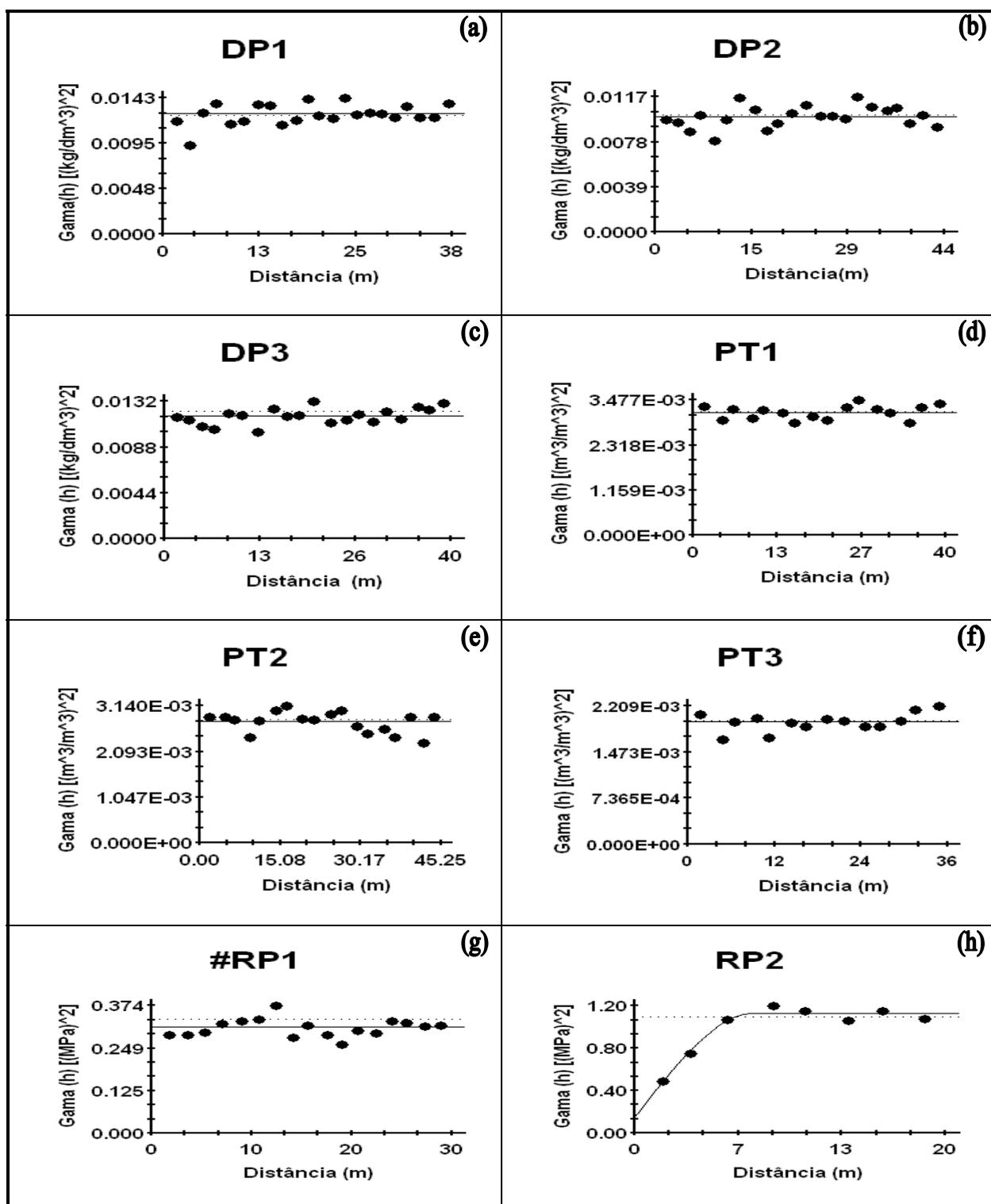


Figura 14: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, #RP1 e RP2) sob **cultivo mínimo**

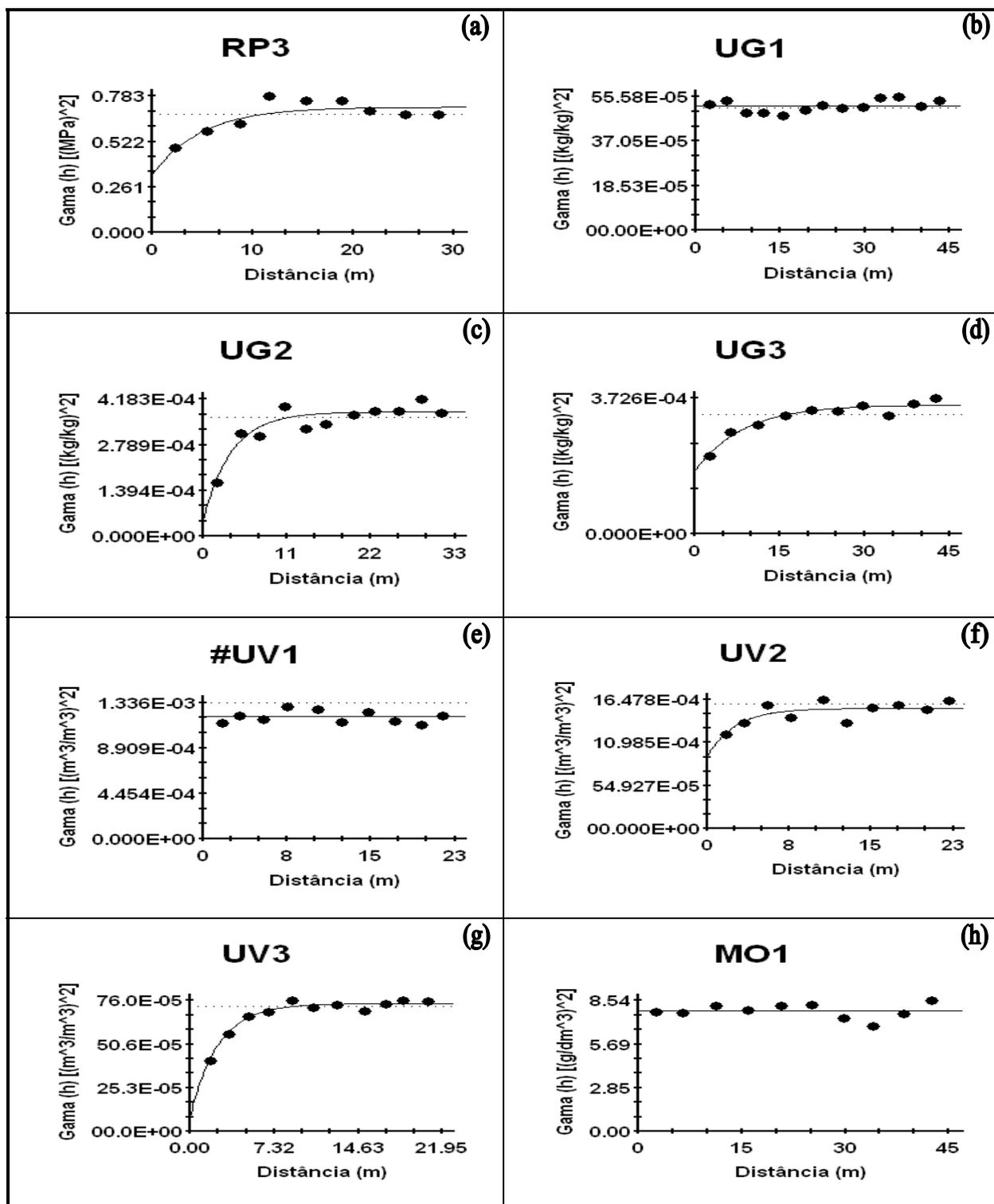


Figura 15: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (RP3, UG1, UG2, UG3, #UV1, UV2, UV3 e MO1) sob **cultivo mínimo**

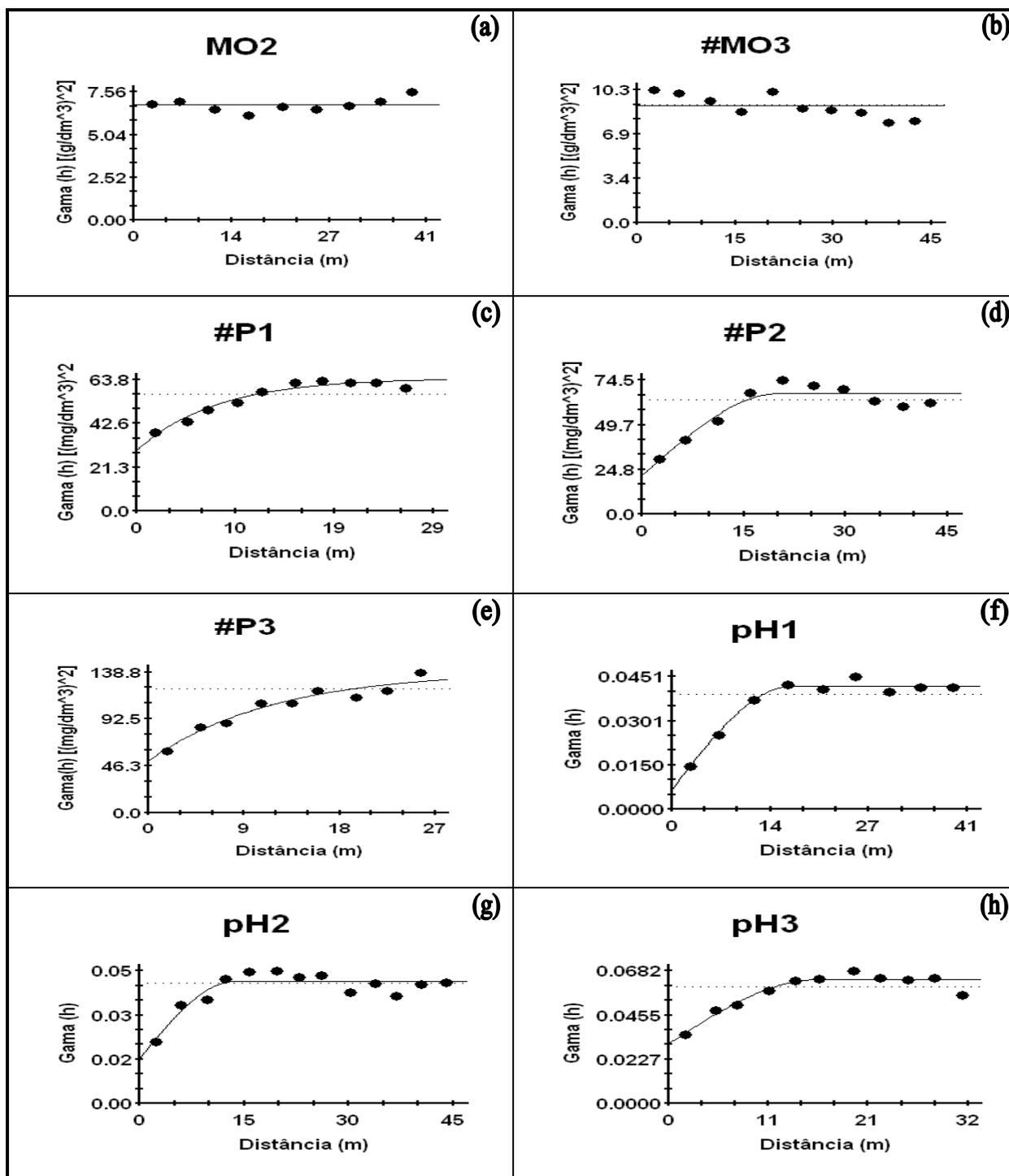


Figura 16: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO2, #MO3, #P1, #P2, #P3, pH1, pH2 e pH3) sob cultivo mínimo

qual foi de 0,966. Em relação ao ADE, o forte valor verificado (87,3%) discordou de Santos et al. (2005), que foi moderado (73,5%). O modelo esférico ajustado para o RP2 ficou de acordo com o observado por Santos et al. (2005) e Carvalho et al. (2006), diferentemente do modelo exponencial obtido por Freddi et al. (2006). Também, o alcance do RP2 do presente (7,7 m) foi menor do que todos aqueles dos citados autores, que variaram entre 20,2 e 67,1 m (Quadro 15 e 16).

Nos Quadros 15 e 16, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) #P3 (35,4 m), 2) UG3 (25,6 m), 3) #P1 (23,0 m), 4) #P2 (20,4 m), 5) pH1 (16,5 m), 6) pH3 (15,7 m), 7) RP3 (14,7 m), 8) pH2 (13,8 m), 9) UG2 (11,1 m), 10) DS2 (9,8 m), 11) RP2 e UV2 (7,7 m), 12) UV3 (7,2 m) e 13) #DS3 (6,6 m). Portanto, nas condições da presente pesquisa, assim como, visando auxiliar pesquisas futuras, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 6,6 m.

4.4.1.1.2 Plantio direto

Nos Quadros 17 e 18 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade do feijão e de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) sob plantio direto. Já nas Figuras 17, 18, 19 e 20 foram apresentados seus respectivos semivariogramas. Assim, ficou atestado que, com exceção da NGP, MCG, DS2, DS3, DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, RP1, RP2, UG3, UV2, UV3, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial.

No tocante ao desempenho dos semivariogramas (Quadros 17 e 18), a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) MO1 (0,997), 2) NVP (0,984), 3) P1 (0,980), 4) UG1 e pH3 (0,976), 5) DS1 (0,973), 6) P3 (0,968), 7) UG2 (0,962), 8) NGV (0,961), 9) pH2 (0,936), 10) RP3 (0,925), 11) MO3 (0,920), 12) MO2 e P2 (0,912), 13) UV1 (0,897), 14) pH1 (0,851) e 15) PRG (0,766). Assim, em relação aos três primeiros, que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se o seguinte. Para o primeiro (MO1), seu valor do r^2 (0,997), que indicou ser tal atributo o de melhor ajuste semivariográfico, discordando daquele observado por Bezerra (2008), estudando um Latossolo cultivado com milho, semeado sobre pastagem irrigada, não encontrou variabilidade espacial para MO1. Para o segundo (NVP, Quadro 17), seu valor do r^2 (0,984) indicou ser tal atributo o segundo de melhor ajuste semivariográfico. Já para o

Quadro 17: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

Parâmetros								
Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Efeito		Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	Avaliador da dependência espacial	
		Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)				ADE ^(d)	Classe
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>								
PRG (kg ha ⁻¹)	exp (54)	4,650.10 ⁴	1,794.10 ⁵	10,7	0,766	1,220.10 ⁹	74,1	moderada
NVP	esf (73)	4,880	9,761	15,0	0,984	2,360.10 ⁻¹	50,0	moderada
NGV	exp (60)	1,000.10 ⁻³	6,480.10 ⁻¹	12,6	0,961	5,403.10 ⁻³	99,8	forte
NGP	epp	2,923.10 ²	2,923.10 ²	-	-	-	-	-
MCG	epp	1,203	1,203	-	-	-	-	-
<i>γ(h) simples dos atributos físicos do solo</i>								
DS1 (kg dm ⁻³)	gau (69)	4,000.10 ⁻³	1,060.10 ⁻²	10,5	0,973	8,660.10 ⁻⁷	62,3	moderada
DS2 (kg dm ⁻³)	epp	4,555.10 ⁻³	4,555.10 ⁻³	-	-	-	-	-
DS3 (kg dm ⁻³)	epp	3,221.10 ⁻³	3,221.10 ⁻³	-	-	-	-	-
DP1 (kg dm ⁻³)	epp	1,717.10 ⁻²	1,717.10 ⁻²	-	-	-	-	-
DP2 (kg dm ⁻³)	epp	2,124.10 ⁻²	2,124.10 ⁻²	-	-	-	-	-
DP3 (kg dm ⁻³)	epp	1,743.10 ⁻²	1,743.10 ⁻²	-	-	-	-	-
PT1 (m ³ m ⁻³)	epp	3,021.10 ⁻³	3,021.10 ⁻³	-	-	-	-	-
PT2 (m ³ m ⁻³)	epp	2,808.10 ⁻³	2,808.10 ⁻³	-	-	-	-	-
PT3 (m ³ m ⁻³)	epp	2,653.10 ⁻³	2,653.10 ⁻³	-	-	-	-	-
RP1 (MPa)	epp	5,298.10 ⁻¹	5,298.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
RP2 (MPa)	epp	4,971.10 ⁻¹	4,971.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
RP3 (MPa)	esf (51)	1,135.10 ⁻¹	3,860.10 ⁻¹	8,6	0,925	3,583.10 ⁻³	92,5	forte

(continua...)

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão, NVP = número de vagens por planta, NGV = número de grãos por vagem, NGP = número de grãos por planta, MCG = massa de cem grãos, DS = densidade do solo, DP = densidade da partícula, PT = porosidade total, RP = resistência à penetração; ^(b) exp = exponencial, esf = esférico, gau = gaussiano e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Quadro 18: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

(...continuação)

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Parâmetros					Avaliador da dependência espacial	
		Efeito		Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	Classe
		Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)					
<i>γ(h) simples dos atributos físicos do solo</i>								
UG1 (kg kg ⁻¹)	exp (62)	2,260.10 ⁻⁴	6,890.10 ⁻⁴	15,5	0,976	1,764.10 ⁻⁹	67,2	moderada
UG2 (kg kg ⁻¹)	exp (65)	3,700.10 ⁻⁵	5,230.10 ⁻⁴	9,4	0,962	2,009.10 ⁻⁹	93,0	forte
UG3 (kg kg ⁻¹)	epp	8,620.10 ⁻⁴	8,620.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
UV1 (m ³ m ⁻³)	exp (50)	1,236.10 ⁻³	2,482.10 ⁻³	14,4	0,897	1,077.10 ⁻⁷	50,2	moderada
UV2 (m ³ m ⁻³)	epp	1,710.10 ⁻³	1,710.10 ⁻³	-	-	-	-	-
UV3 (m ³ m ⁻³)	epp	1,726.10 ⁻³	1,726.10 ⁻³	-	-	-	-	-
<i>γ(h) simples dos atributos químicos do solo</i>								
MO1 (g dm ⁻³)	gau (102)	3,140	7,847	19,2	0,997	6,910.10 ⁻²	60,0	moderada
MO2 (g dm ⁻³)	gau (100)	5,480	1,425.10	22,3	0,912	5,450	56,0	moderada
MO3 (g dm ⁻³)	esf (102)	3,900	9,988	15,5	0,920	1,870	61,0	moderada
P1 (mg dm ⁻³)	gau (76)	1,320.10	3,625.10	8,8	0,980	6,800	64,1	moderada
P2 (mg dm ⁻³)	esf (91)	2,210.10	5,628.10	14,4	0,912	5,960.10	59,7	moderada
P3 (mg dm ⁻³)	exp (52)	9,100	5,250.10	11,1	0,968	2,040.10	82,7	forte
pH1 (CaCl ₂)	esf (91)	1,240.10 ⁻²	1,178.10 ⁻¹	21,1	0,851	1,490.10 ⁻³	89,5	forte
pH2 (CaCl ₂)	gau (91)	3,460.10 ⁻²	1,232.10 ⁻¹	21,1	0,936	5,7060.10 ⁻⁴	71,8	moderada
pH3 (CaCl ₂)	esf (89)	2,680.10 ⁻²	1,156.10 ⁻¹	23,2	0,976	1,861.10 ⁻⁴	76,8	forte

^(a) UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, MO = matéria orgânica, P = fósforo, pH = potencial hidrogeniônico; ^(b) exp = exponencial, gau = gaussiano, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

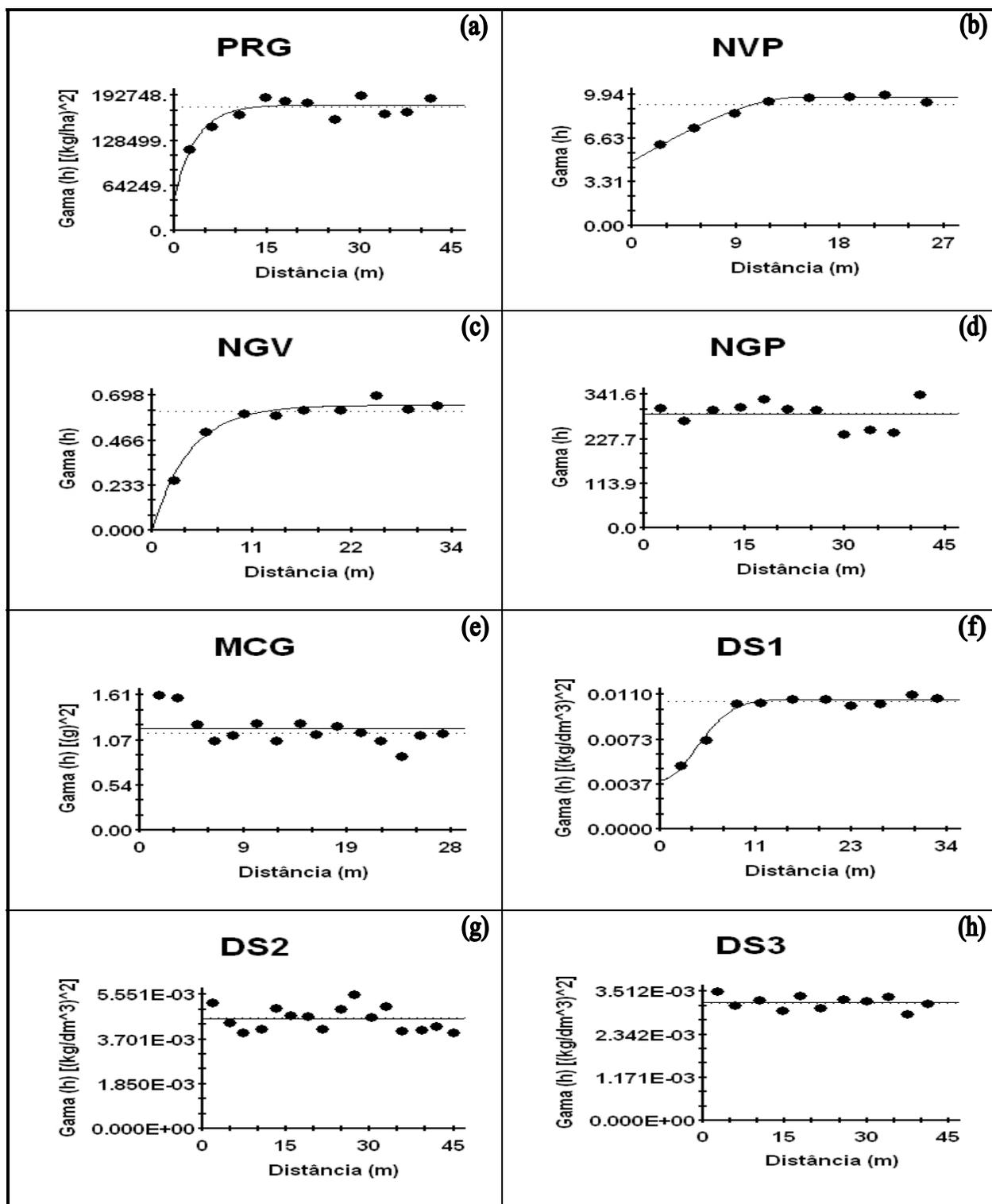


Figura 17: Semivariogramas simples dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP, NGV, NGP, MCG) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, DS2 e DS3) sob **plantio direto**

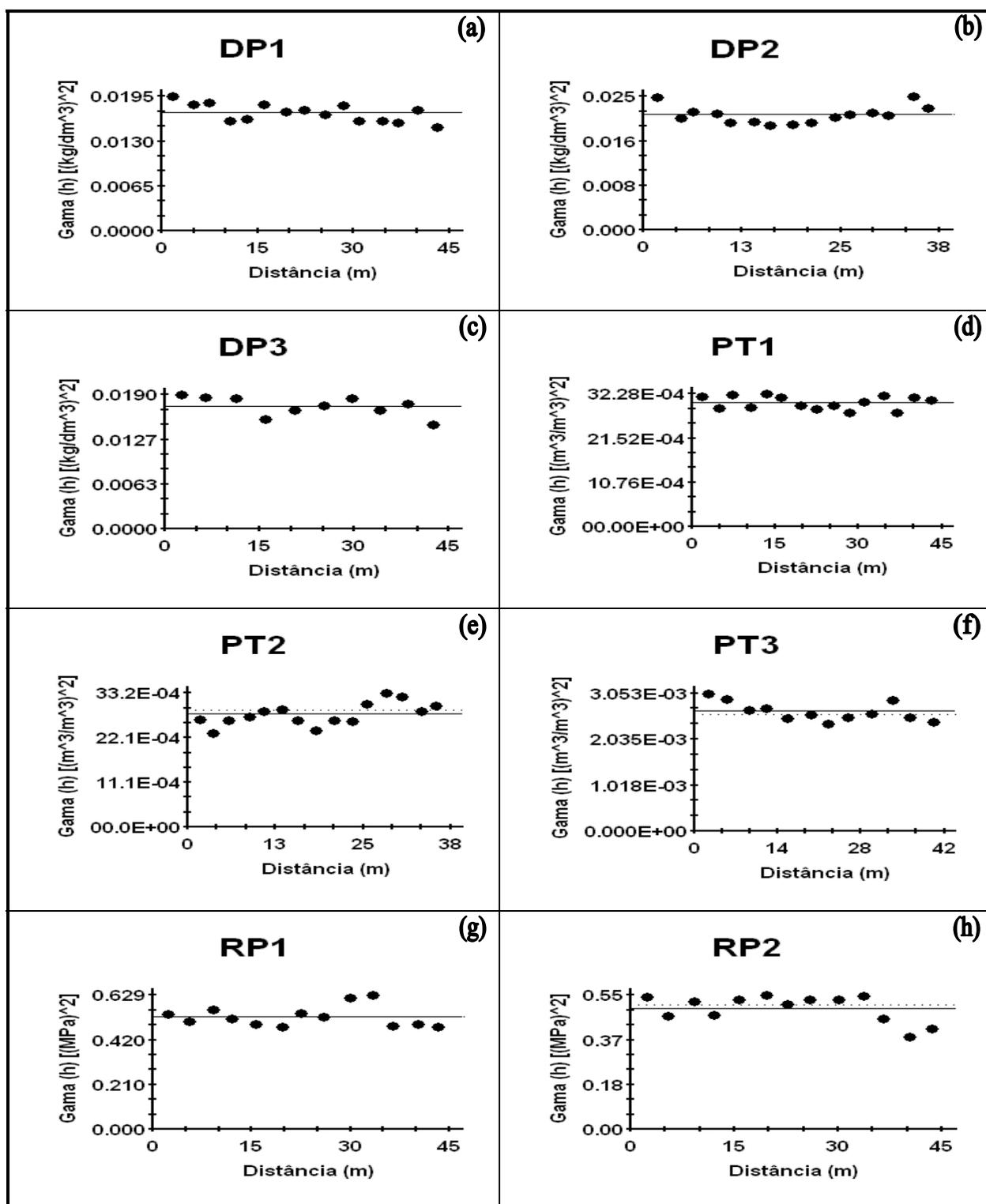


Figura 18: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DP1, DP2, DP3, PT1, PT2, PT3, RP1 e RP2) sob **plantio direto**

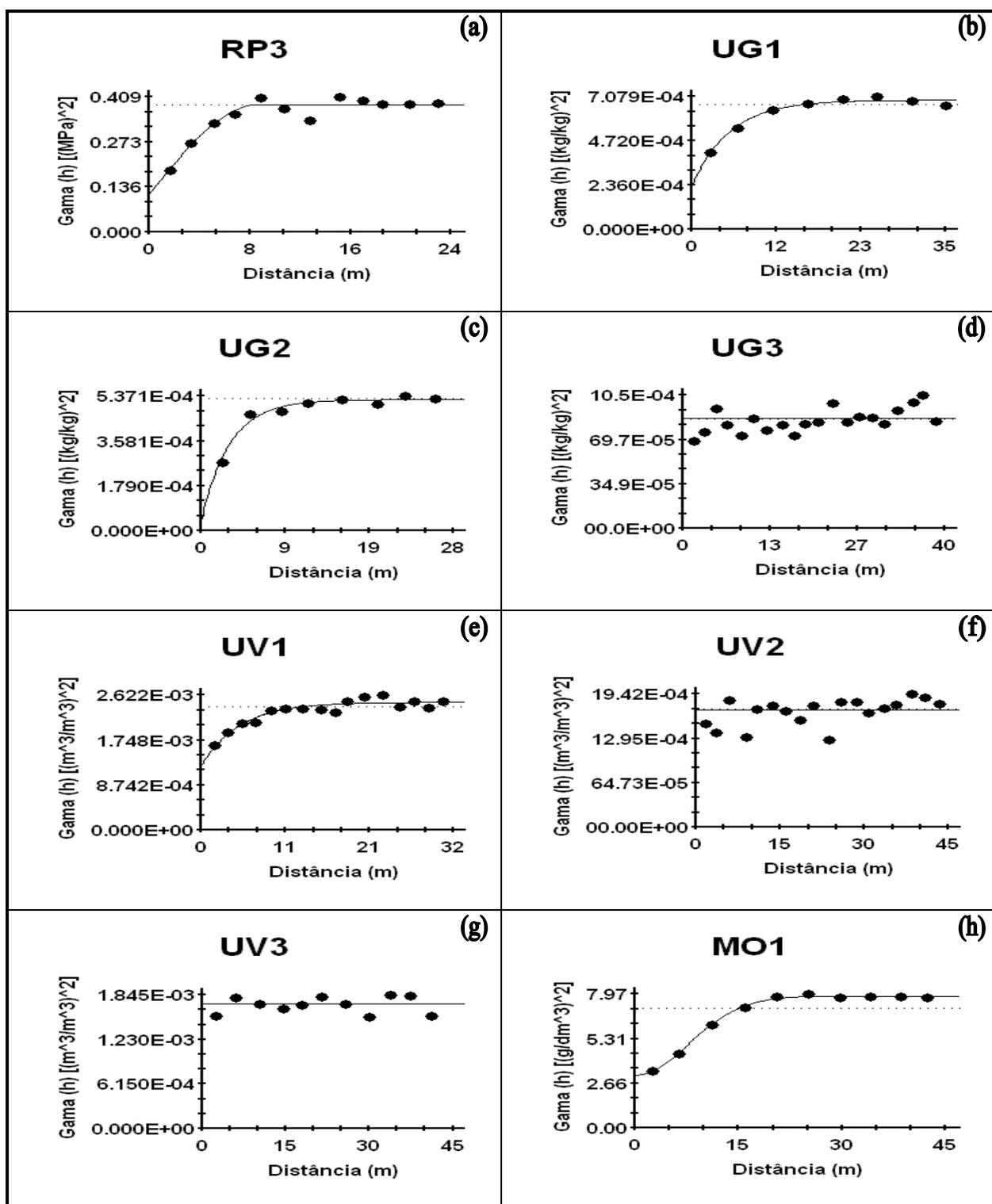


Figura 19: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV2, UV3 e MO1) sob **plantio direto**

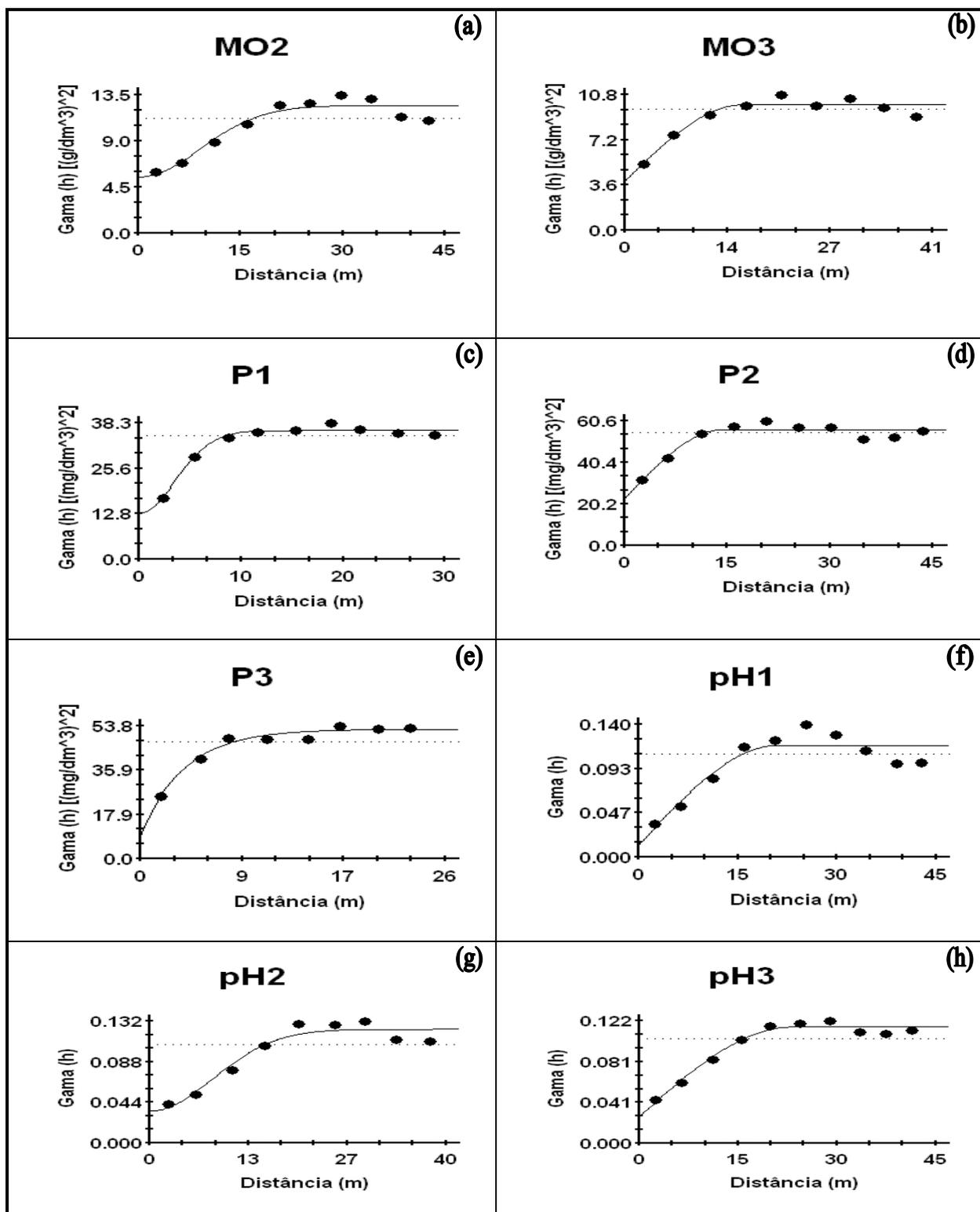


Figura 20: Semivariogramas simples dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO2, MO3, P1, P2, P3, pH1, pH2 e pH3) sob **plântio direto**

terceiro (P1, Quadro 18), seu valor do r^2 (0,980), que indicou ser tal atributo o terceiro de melhor ajuste semivariográfico, discordou dos resultados encontrados por Manzione (2002), Weirich Neto et al. (2005) que trabalharam, respectivamente com Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico que detectaram efeito pepita puro para fósforo.

Nos Quadros 17 e 18, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) pH3 (23,2 m), 2) MO2 (22,3 m), 3) pH1 e pH2 (21,1 m), 4) MO1 (19,2 m), 5) UG1 e MO3 (15,5 m), 6) NVP (15,0 m), 7) UV1 e P2 (14,4 m), 8) NGV (12,6 m), 9) P3 (11,1 m), 10) PRG (10,7 m), 11) DS1 (10,5 m), 12) UG2 (9,4 m), 13) P1 (8,8 m) e 14) RP3 (8,6). Portanto, nas condições do presente estudo, assim como, visando auxiliar pesquisa futura, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os programas computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores que 8,6 m. Por outro lado, exclusivamente para os atributos de planta, não menores que 10,7 m.

4.4.1.1.3 Comparações entre tratamentos

Em relação ao coeficiente de determinação espacial (r^2), os tratamentos CM e PD apresentaram os atributos P1 e P3 com valores do referido coeficiente entre os seis primeiros. Portanto, tanto para as condições de cultivo mínimo quanto de plantio direto, os teores de fósforo da primeira e terceira camadas resultaram excelentes ajustes semivariográficos.

4.4.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados dos atributos

4.4.1.2.1 Cultivo mínimo

No Quadro 19 estão apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS), para o cultivo mínimo. Nas Figuras 21 e 22 são apresentadas as respectivas validações. A relação decrescente delas, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) pH1 (0,721), 2) #P2 (0,633), 3) #P3 (0,629), 4) #P1 (0,550), 5) pH2 (0,508), 6) RP3 (0,465), 7) RP2 (0,464), 8) pH3 (0,437), 9) UG2 (0,416), 10) DS2 (0,364), 11) UV3 (0,257), 12) UG3 (0,230), 13) #DS3 (0,217) e 14) UV2 (0,176). Assim, as cinco melhores validações cruzadas foram estabelecidas para os atributos pH1, #P2, #P3, #P1 e o pH2, cujos coeficientes de correlação variaram de 0,721 a 0,508. Tais atributos foram ranqueados aleatoriamente, apresentando uma seqüência relativamente semelhante que aquela estabelecida para a grandeza decrescente dos seus alcances, estabelecidos no Quadro 19. Pode-se ressaltar que o atributo pH1 resultou o maior coeficiente de determinação espacial

Quadro 19: Parâmetros das validações cruzadas referentes as krigagens de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a + b . VE ^(b)	
		a	b
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos físicos do solo</i>			
DS2 (kg dm ⁻³)	0,364	3,400.10 ⁻¹	0,747
#DS3 (kg dm ⁻³)	0,217	4,230.10 ⁻¹	0,690
RP2 (MPa)	0,464	3,700.10 ⁻¹	0,847
RP3 (MPa)	0,465	-6,600.10 ⁻²	1,027
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,416	4,000.10 ⁻²	0,833
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,230	6,000.10 ⁻²	0,722
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,176	7,000.10 ⁻²	0,749
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,257	1,000.10 ⁻¹	0,668
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos químicos do solo</i>			
#P1 (mg dm ⁻³)	0,550	1,196.10 ⁻¹	1,115
#P2 (mg dm ⁻³)	0,633	0,000	0,988
#P3 (mg dm ⁻³)	0,629	-5,000.10 ⁻²	1,116
pH1 (CaCl ₂)	0,721	-2,000.10 ⁻¹	1,041
pH2 (CaCl ₂)	0,508	6,000.10 ⁻¹	0,987
pH3 (CaCl ₂)	0,437	4,300.10 ⁻¹	0,909

^(a) DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, P = fósforo, pH = potencial hidrogeniônico; e atributo precedido por # identifica resíduo dos dados; ^(b) VO = valor observado e VE = valor estimado

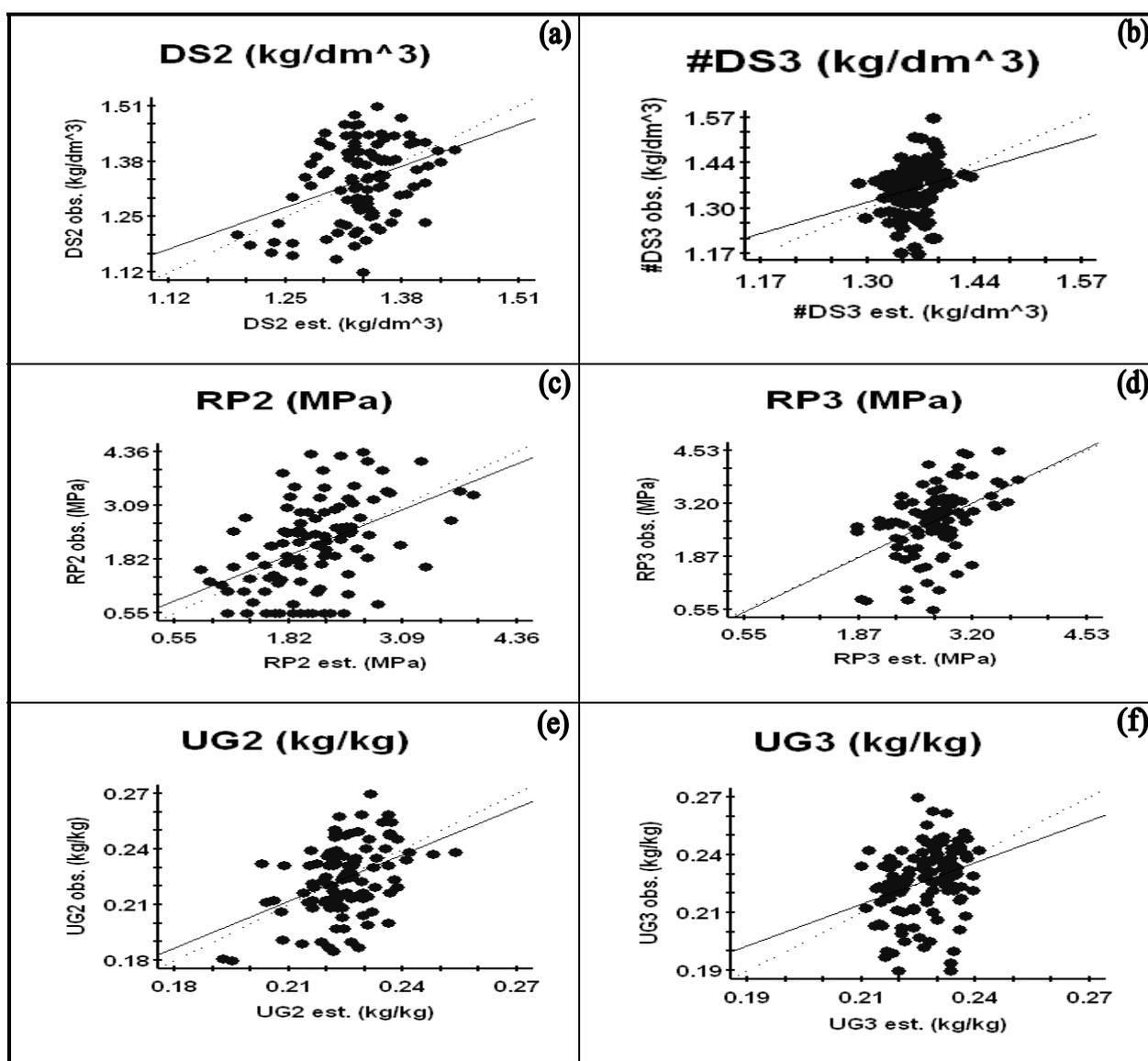


Figura 21: Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS2, #DS3, RP2, RP3, UG2 e UG3) sob **cultivo mínimo**

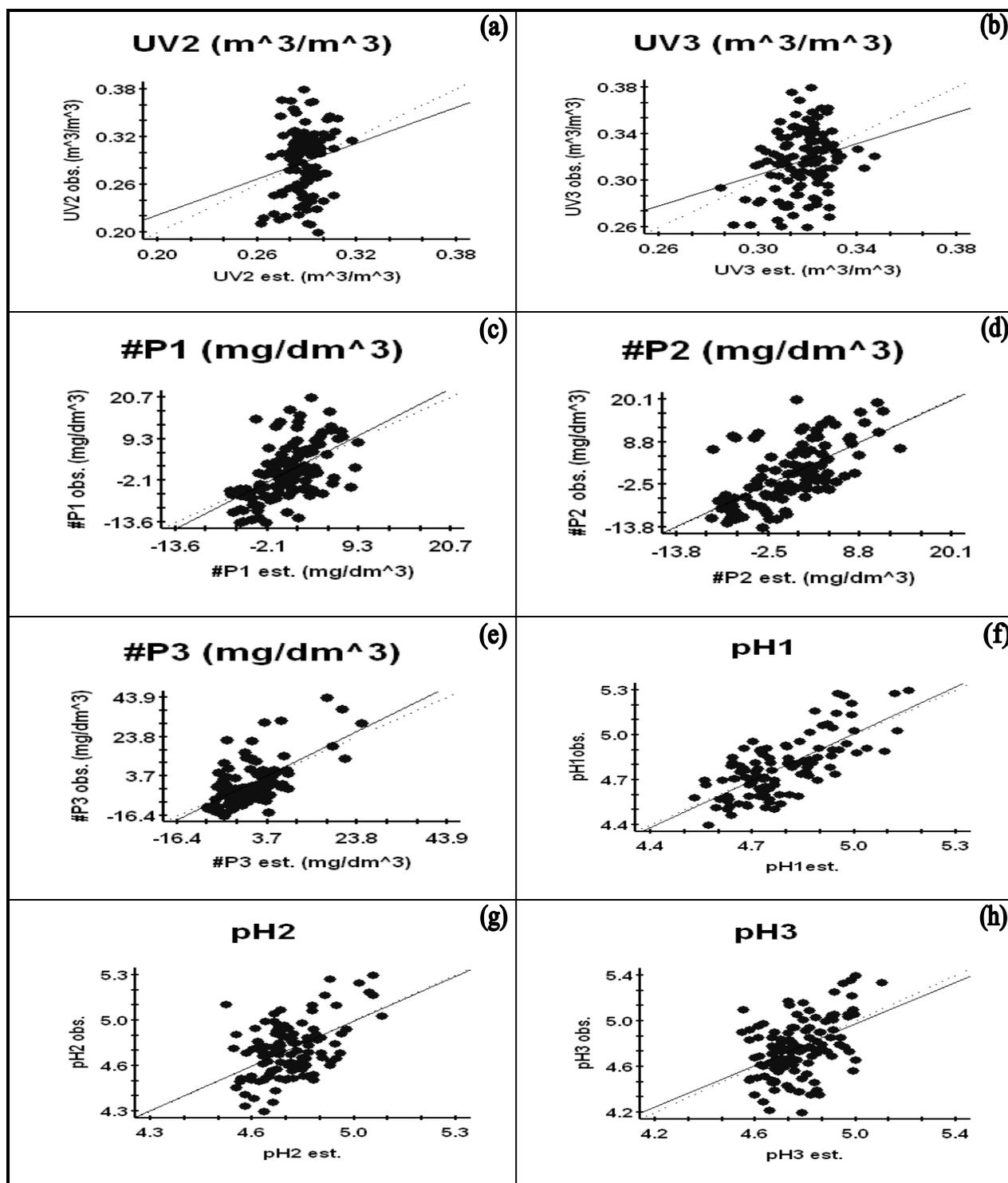


Figura 22: Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UV2, UV3, #P1, #P2, #P3, pH1, pH2 e pH3) sob **cultivo mínimo**

(r^2) e também o maior coeficiente de correlação (r) para a validação cruzada. Dessa forma, quando do ponto de vista da análise geoestatística, o pH1 apresentou-se como um plausível indicador da qualidade química do solo quando preparado pelo cultivo mínimo com escarificação. Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,668 (UV3) e 1,116 (#P3).

4.4.1.2.2 Plantio direto

No Quadro 20 estão apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS), para o plantio direto. Nas Figuras 23, 24 e 25 são apresentadas às respectivas validações. A relação decrescente delas, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) pH1 (0,787), 2) pH2 (0,770), 3) pH3 (0,682), 4) MO1 (0,626), 5) MO2 (0,608), 6) DS1 (0,500), 7) NGV (0,493), 8) PRG (0,466), 9) RP3 (0,456), 10) MO3 (0,443), 11) UG1 (0,432), 12) UV1 (0,412), 13) P2 (0,402), 14) P1 (0,373), 15) P3 (0,364), 16) NVP (0,362) e 17) UG2 (0,110). Dessa forma, as cinco melhores validações cruzadas foram estabelecidas para os atributos pH1, pH2, pH3, MO1 e MO2, cujos coeficientes de correlação variaram de 0,787 a 0,608. Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 1,003 (MO2) e 0,244 (UG2).

4.4.1.2.3 Comparação entre tratamentos

Em relação ao coeficiente de correlação (r) das validações cruzadas, os tratamentos CM e PD apresentaram os atributos pH1 e pH2 com valores do referido coeficiente entre os seis primeiros. Portanto, tanto para as condições de cultivo mínimo quanto de plantio direto, os valores do pH da primeira e segunda camadas resultaram excelentes ajustes semivariográficos, atestados pela validação cruzada.

4.4.1.3 Mapas de krigagem dos atributos estudados

4.4.1.3.1 Cultivo mínimo

Nas Figuras 26 e 27 estão apresentados os mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) para o sistema cultivo mínimo. Em relação aos mapas apresentados serão comentados aqueles de elevada semelhança espacial para efeito prático de manejo do solo. Dessa forma, foi observada a referida semelhança entre o mapa da densidade do solo (DS2) e o mapa da resistência à penetração (RP2). Assim, nas Figuras 26a e 26c, são observados os mapas de krigagem da densidade do solo (DS2) e da resistência à penetração (RP2) que apresentaram os menores valores (1,15-1,27 kg dm⁻³ e 0,63-1,90 MPa) concentrados em sua maioria na região norte do mapa. Por outro lado, nas demais regiões, tal

Quadro 20: Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plântio direto**

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a + b . VE ^(b)	
		a	b
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos da planta</i>			
PRG (kg ha ⁻¹)	0,466	-1,338.10	0,999
NVP	0,362	1,666	0,856
NGV	0,493	1,090	0,822
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos físicos do solo</i>			
DS1 (kg dm ⁻³)	0,500	2,100.10 ⁻¹	0,843
RP3 (MPa)	0,456	4,500.10 ⁻¹	0,867
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,432	2,000.10 ⁻²	0,893
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,110	1,600.10 ⁻¹	0,244
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,412	1,000.10 ⁻²	0,976
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos químicos do solo</i>			
MO1 (g dm ⁻³)	0,626	4,000.10 ⁻²	0,999
MO2 (g dm ⁻³)	0,608	-6,000.10 ⁻²	1,003
MO3 (g dm ⁻³)	0,443	2,81	0,810
P1 (mg dm ⁻³)	0,373	6,13	0,688
P2 (mg dm ⁻³)	0,402	3,75	0,700
P3 (mg dm ⁻³)	0,364	2,36	0,778
pH1 (CaCl ₂)	0,787	1,100.10 ⁻¹	0,977
pH2 (CaCl ₂)	0,770	2,000.10 ⁻²	0,996
pH3 (CaCl ₂)	0,682	1,500.10 ⁻¹	0,971

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão, NVP = número de vagens por planta, NGV = número de grãos por vagem, DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, MO = matéria orgânica, P = fósforo, pH = potencial hidrogeniônico; ^(b) VO = valor observado e VE = valor estimado

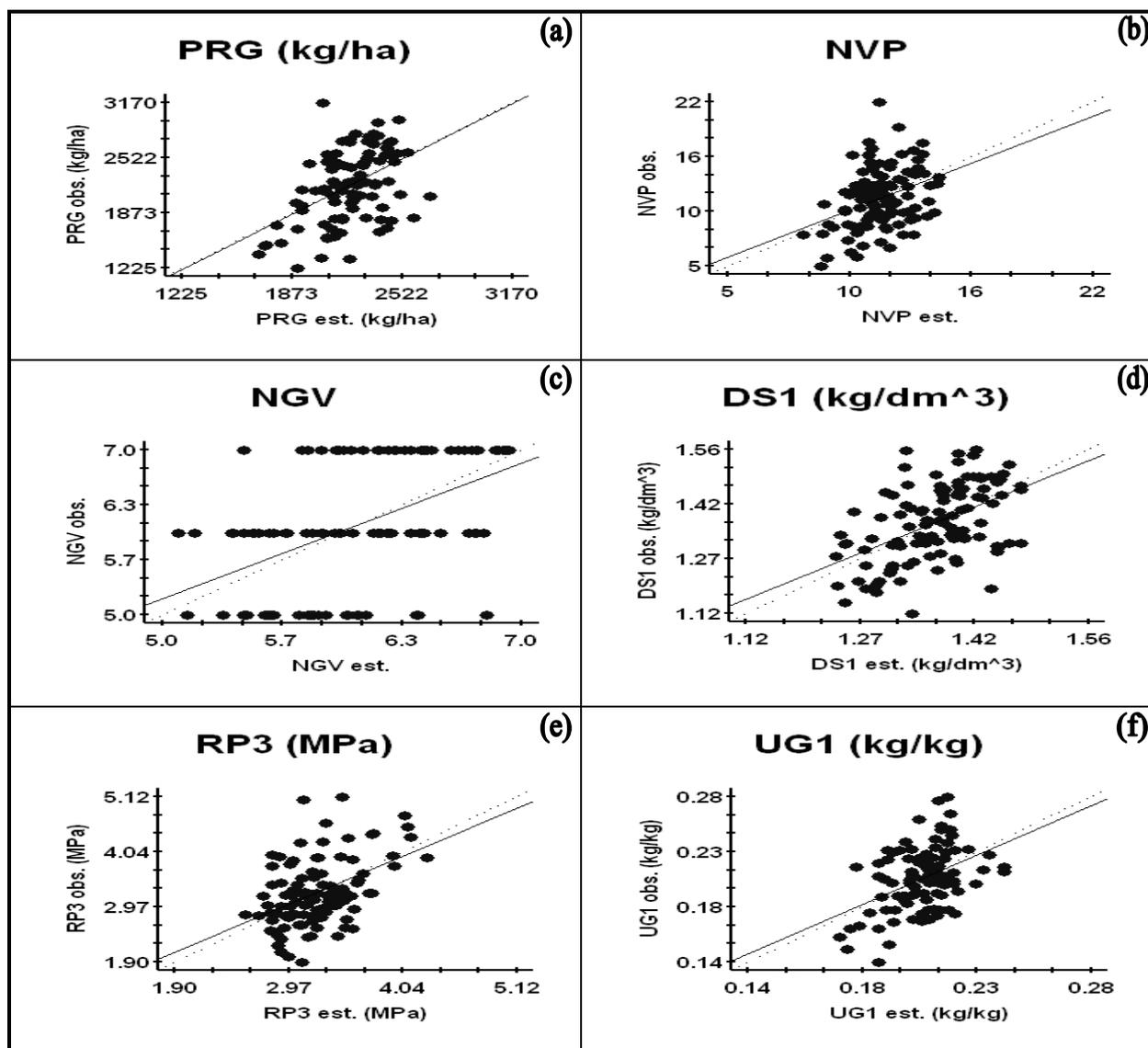


Figura 23: Validação cruzada dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP, NGV) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, RP3 e UG1) sob **plantio direto**

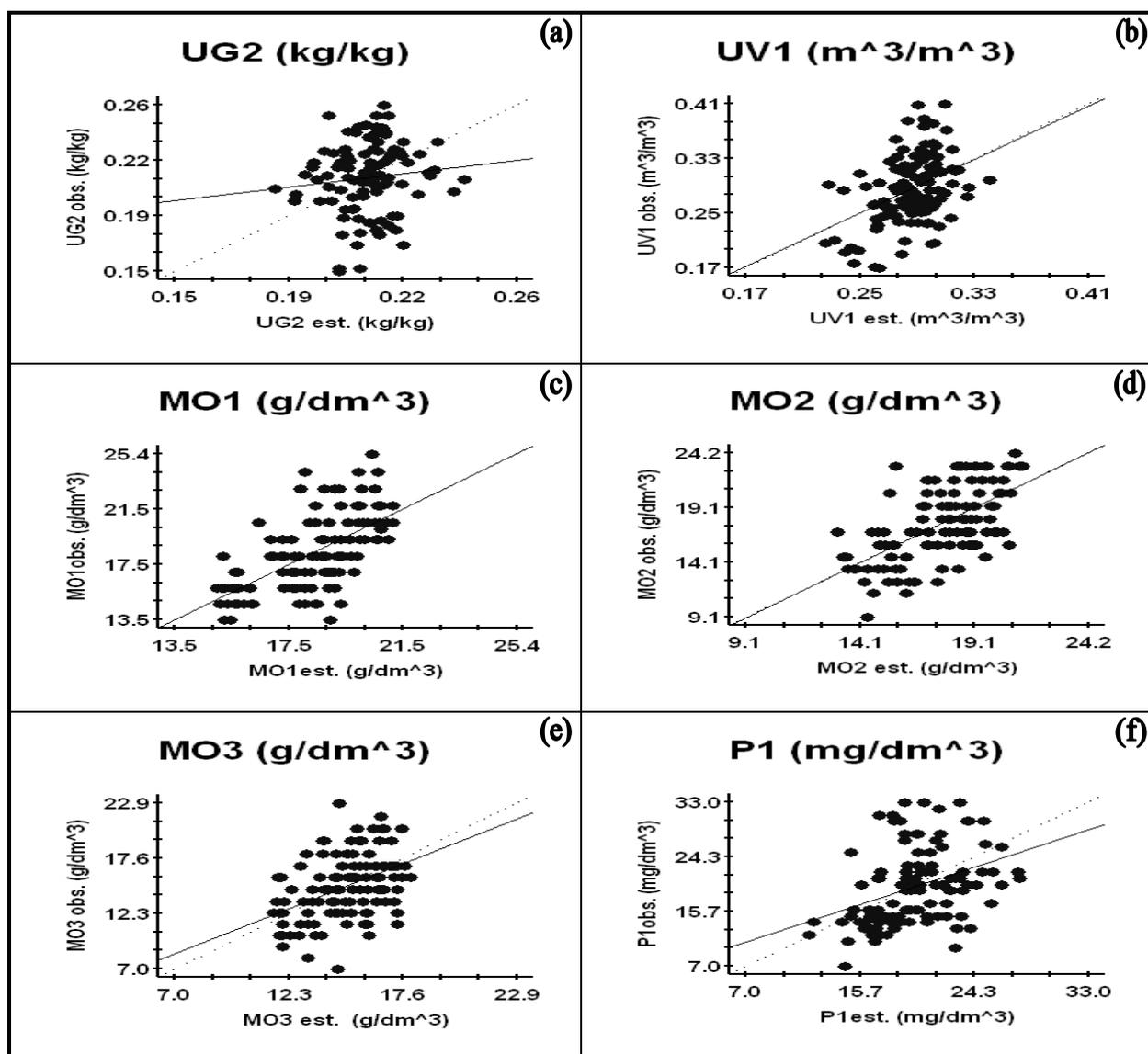


Figura 24: Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UG2, UV1, MO1, MO2, MO3 e P1) sob **plantio direto**

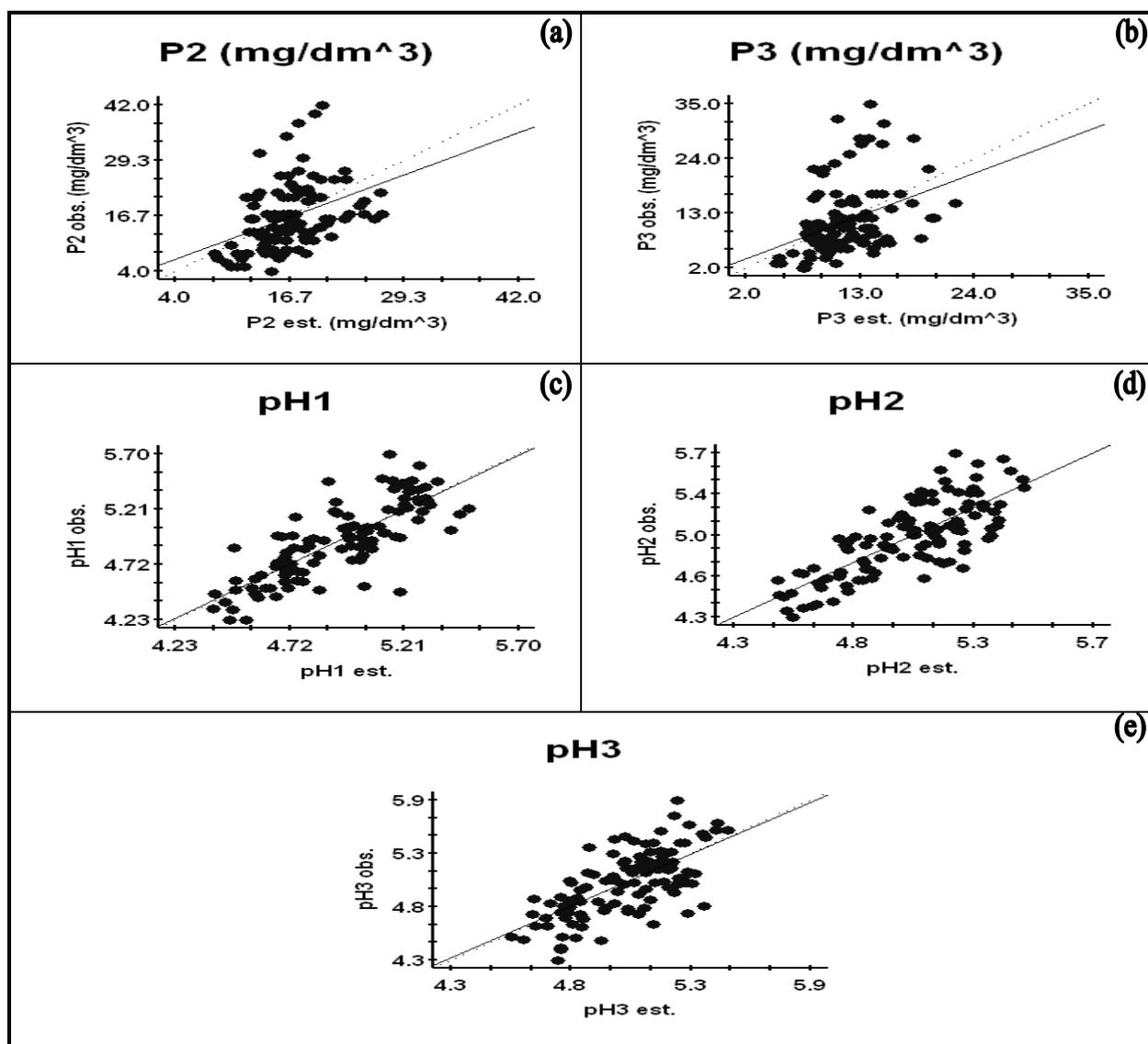


Figura 25: Validação cruzada dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (P2, P3, pH1, pH2 e pH3) sob **plantio direto**

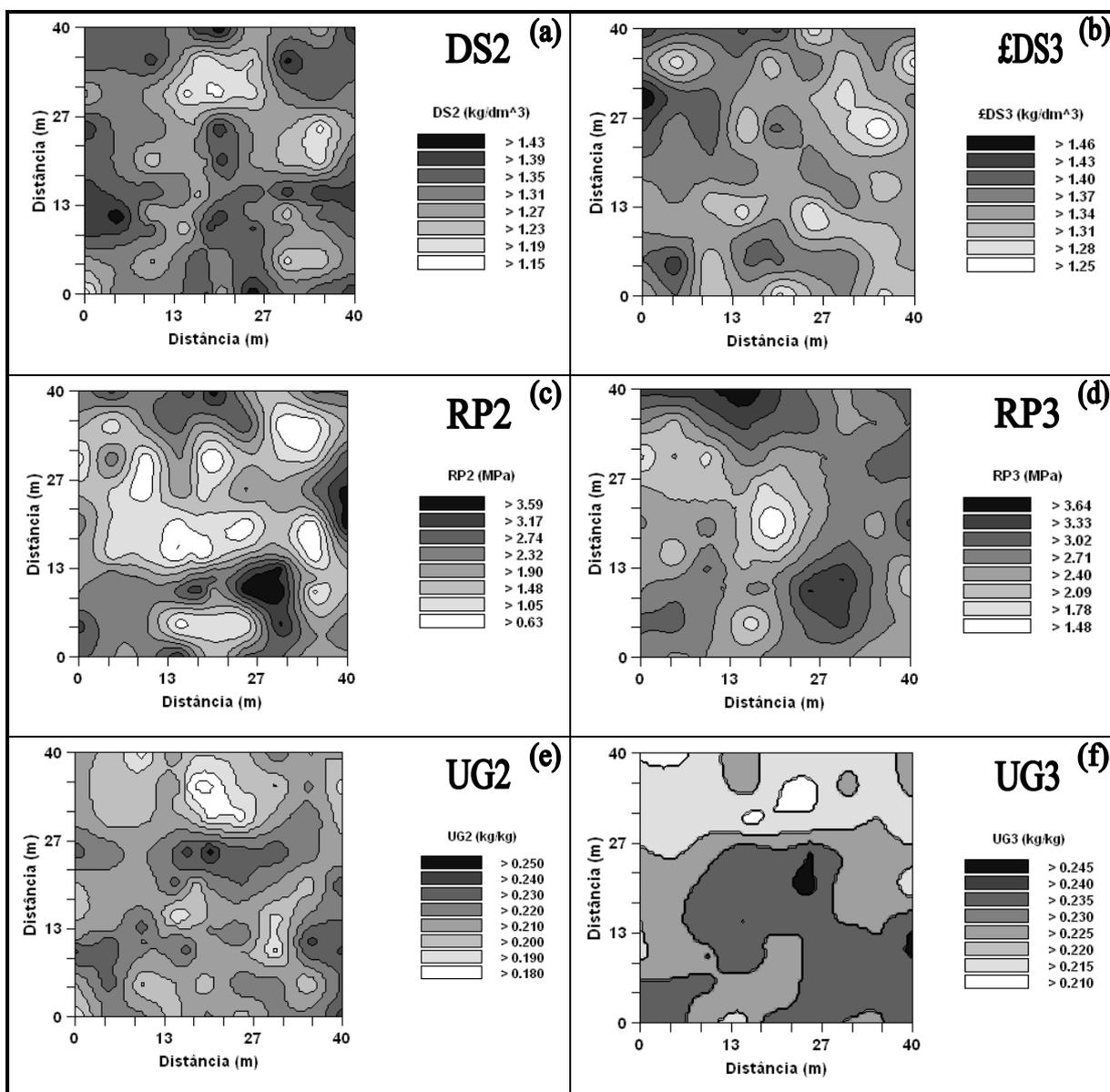


Figura 26: Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS2, £DS3, RP2, RP3, UG2 e UG3) sob cultivo mínimo

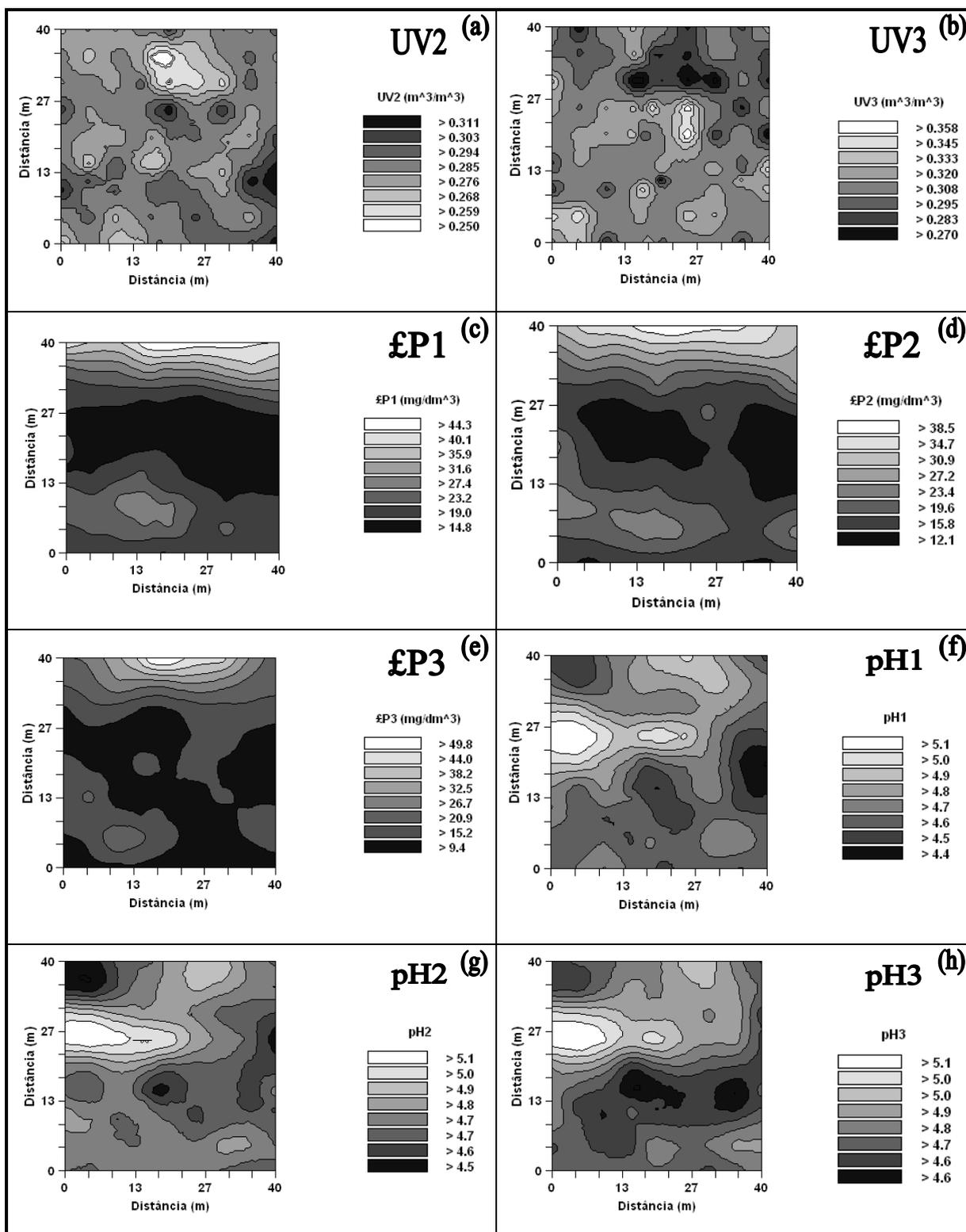


Figura 27: Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (UV2, UV3, £P1, £P2, £P3, pH1, pH2 e pH3) sob **cultivo mínimo**

densidade e resistência variaram entre 1,31-1,43 kg dm⁻³ e 2,32-3,59 MPa respectivamente. Dessa forma, esse mesmo comportamento foi observado por Martins et al. (2009), que encontraram elevada similaridade dos mapas entre a densidade do solo e a resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Distroférico sobre plantio direto nas profundidades 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Pode ser notado também semelhança espacial entre os teores de fósforo (P) ou entre os valores de potencial hidrogeniônico (pH) em profundidade. Assim, nas Figuras 27c, d e e, os mapas de krigagem do teor de fósforo nas três profundidades apresentaram as menores cifras (9,4-27,4 mg dm⁻³) na maioria das regiões dos mapas. Já nas Figuras 27f, g e h, os mapas de krigagem do potencial hidrogeniônico apresentaram as maiores cifras (4,8-5,1) nas regiões noroeste dos mapas.

4.4.1.3.2 Plantio direto

Nas Figuras 28, 29 e 30 estão apresentados os mapas de krigagem da produtividade do feijão e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS) para o sistema plantio direto. Assim, na Figura 28a, é observado o mapa de krigagem da produtividade de grãos do feijão (PRG) que apresentou os maiores valores (2160-2665 kg ha⁻¹) localizados em sua maioria na região central do mapa. Por outro lado, nas demais regiões, tal produtividade variou entre 1487-1992 kg ha⁻¹, corroborando com os valores encontrados por Martins et al. (2009) no qual foram de 2595-3379 kg ha⁻¹. Em relação aos atributos do solo, foi notada, com respeito à PRG, NVP e NGV (Figs. 28a, b e c), uma inversa e elevada semelhança com o comportamento espacial da DS1 (Fig. 28d). Nos sítios onde a DS1 foi maior, entre 1,36-1,46 kg dm⁻³, a PRG resultou menores valores (1487-1992 kg ha⁻¹). Já naqueles onde a DS1 foi menor, entre 1,21-1,32 kg dm⁻³, a PRG resultou seus maiores valores (2160-2665 kg ha⁻¹) situados na região central do mapa.

Nas Figuras 29a, b, c, d, e e f, assim como nas Figuras 30a, b e c são apresentados os mapas de krigagem dos teores de matéria orgânica, fósforo e do potencial hidrogeniônico nas três profundidades avaliadas. Dessa forma, observa-se semelhança espacial entre os atributos referidos em profundidade. Assim, os mapas de krigagem dos teores de matéria orgânica (MO), fósforo (P) e do potencial hidrogeniônico (pH), apresentaram seus maiores valores (14,9-20,9 g dm⁻³; 16,3-26,0 mg dm⁻³ e 4,77-5,4) nas regiões centrais dos mapas, respectivamente.

4.4.2 Análise semivariográfica cruzada

4.4.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem dos atributos

4.4.2.1.1 Cultivo mínimo

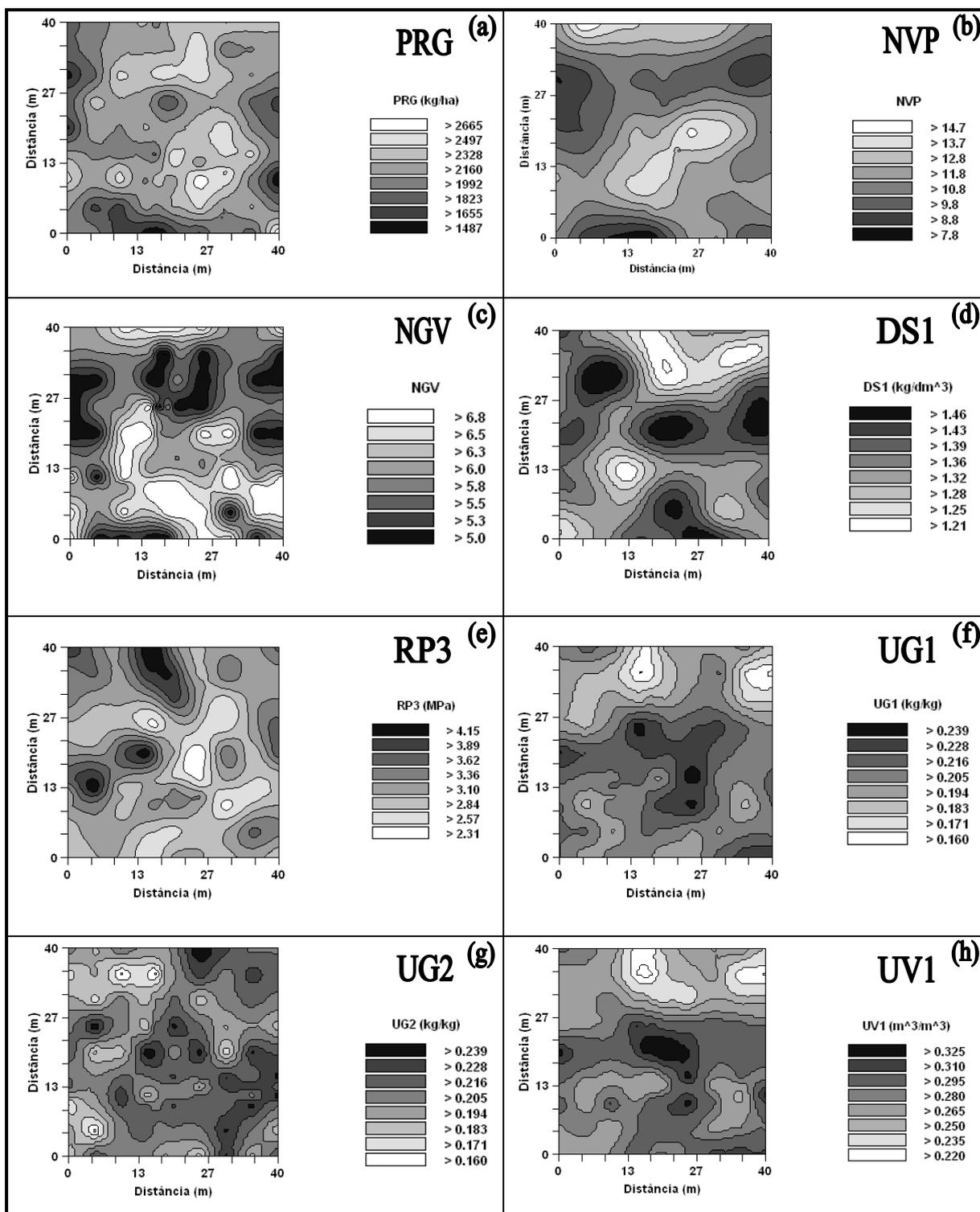


Figura 28: Mapas de krigagem dos atributos da produtividade do feijão (PRG, NVP e NGV) e de um Latossolo Vermelho Distroférico (DS1, RP3, UG1, UG2 e UV1) sob **plantio direto**

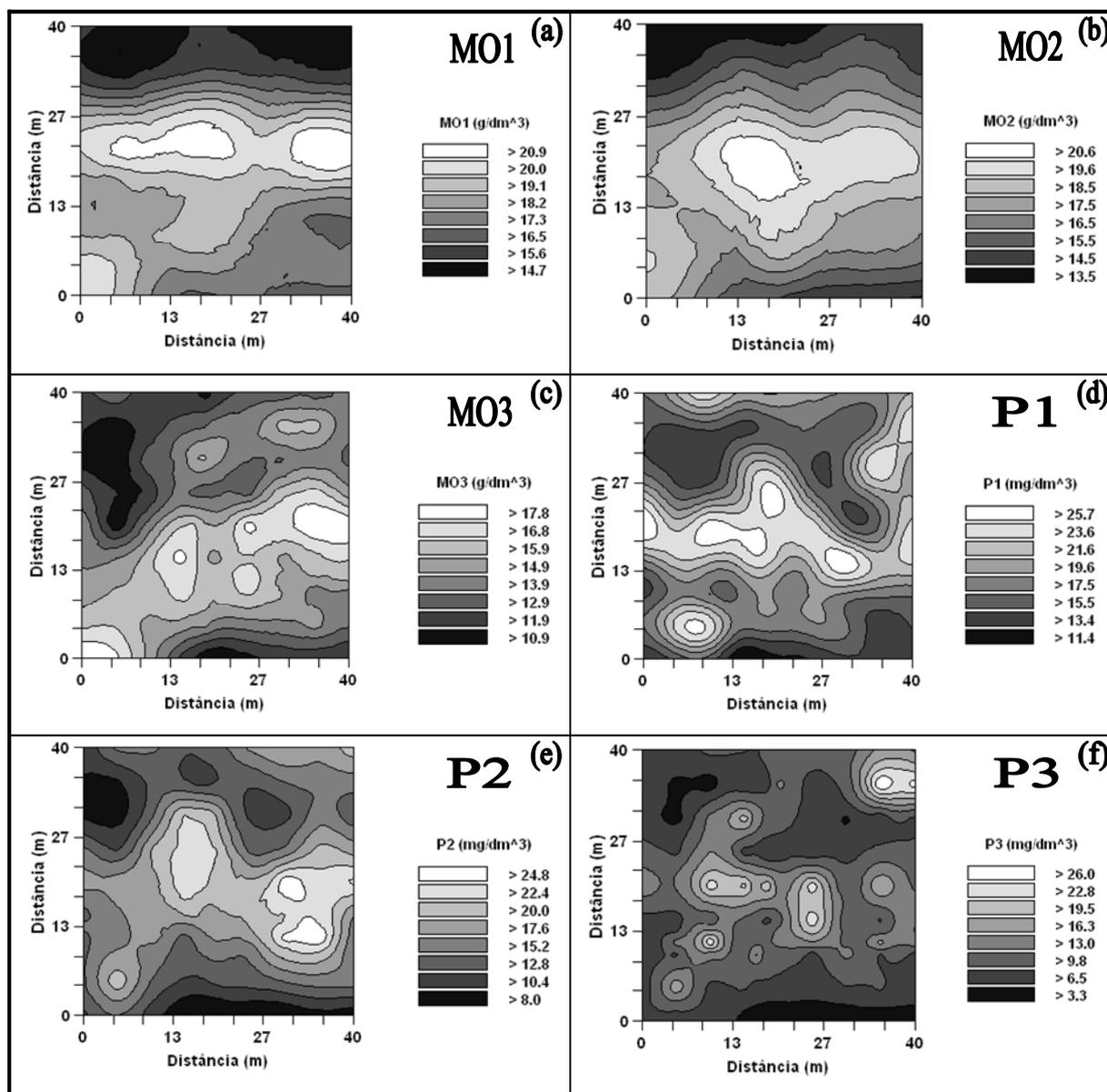


Figura 29: Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (MO1, MO2, MO3, P1, P2 e P3) sob **plantio direto**

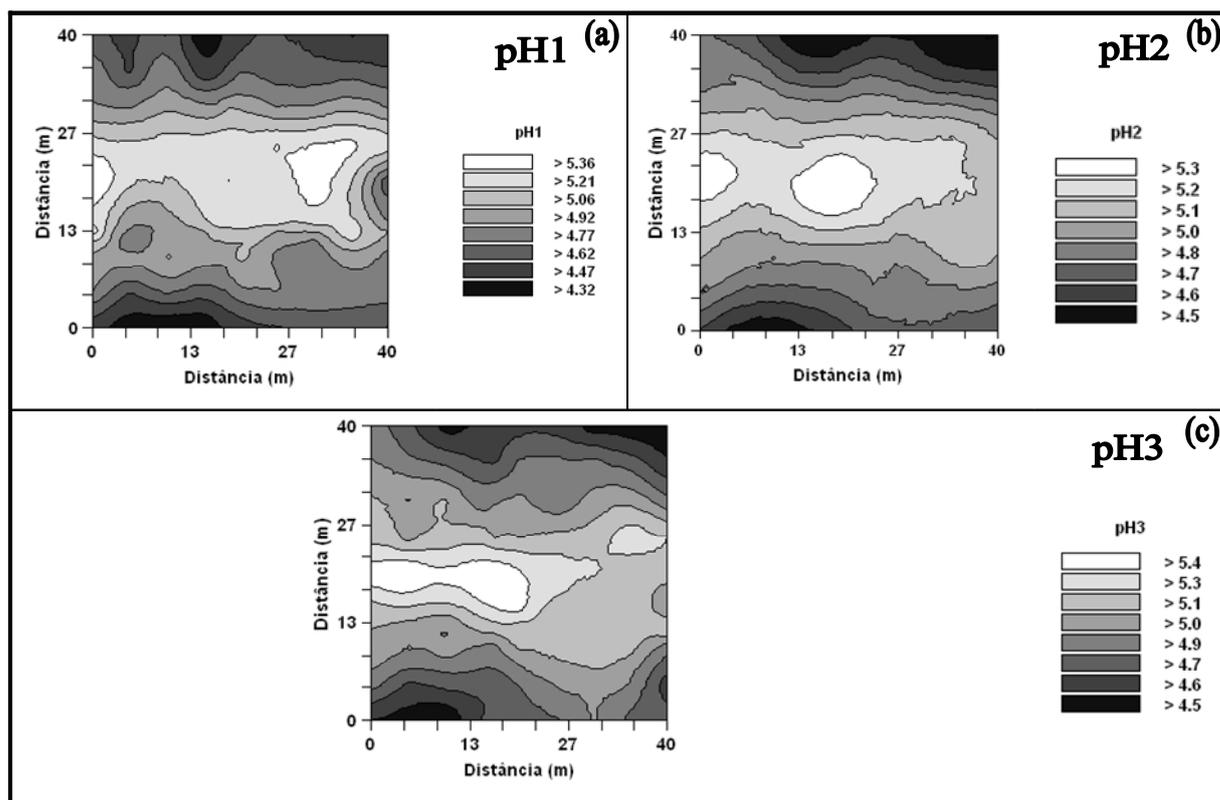


Figura 30: Mapas de krigagem dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico (pH1, pH2 e pH3) sob **plantio direto**

O cultivo mínimo não apresentou semivariograma cruzado entre os atributos de planta *versus* solo, possivelmente devido à escarificação do solo, que desencadeou uma heterogeneização do sistema.

4.4.2.1.2 Plantio direto

No Quadro 21 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas cruzados, ajustados entre alguns atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Nas Figuras 31, 32, 33, 34 e 35 estão contidos os semivariogramas cruzados, as validações cruzadas e os mapas de co-krigagem entre os atributos da planta *versus* solo, ficando atestado que: PRG=f(NVP), PRG=f(UG2), PRG=f(P2), PRG=f(P3) e PRG=f(pH1) apresentaram dependência espacial.

No tocante ao desempenho dos semivariogramas cruzados (Quadro 21), a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) [PRG=f(P2)] (0,880), 2) [PRG=f(pH1)] (0,821), 3) [PRG=f(NVP)] (0,781), 4) [PRG=f(P3)] (0,656) e 5) [PRG=f(UG2)] (0,635). Já a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) [PRG=f(P3)] (0,561), 2) [PRG=f(NVP)] (0,558), 3) [PRG=f(P2)] (0,499), 4) [PRG=f(UG2)] (0,456) e 5) [PRG=f(pH1)] (0,438). Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,601 [PRG=f(pH1)] e 0,781 [PRG=f(NVP)]. Portanto, houve nos dois casos, uma subestimativa dos valores da [PRG=f(pH1)] e [PRG=f(NVP)].

Quadro 21: Parâmetros dos semivariogramas cruzados e validações cruzadas de atributos da produtividade do feijão e de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob **plantio direto**

Atributo ^(a)	Parâmetros										
	Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	Alcance	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							Valor (%)	Classe	a	b	r
PRG=f(NVP) (kg ha⁻¹)	esf (46)	1,000.10	4,708.10 ²	16,5	0,781	3,677.10 ⁴	97,9	forte	4,834.10 ²	0,781	0,558
PRG=f(UG2) (kg ha⁻¹)	esf (35)	6,940.10 ⁻¹	1,808	31,1	0,635	7,350.10 ⁻¹	61,6	moderada	7,033.10 ²	0,680	0,456
PRG=f(P2) (kg ha⁻¹)	esf (46)	3,600.10	7,280.10 ²	14,0	0,880	5,377.10 ⁴	95,1	forte	7,305.10 ²	0,663	0,499
PRG=f(P3) (kg ha⁻¹)	gau (33)	2,300.10	6,261.10 ²	16,6	0,656	1,879.10 ⁵	96,3	forte	5,114.10 ²	0,767	0,561
PRG=f(pH1) (kg ha⁻¹)	gau (36)	2,200.10 ⁻¹	2,165.10	13,0	0,821	9,490.10	99,0	forte	8,791.10 ²	0,601	0,438

^(a) PRG = produtividade de grãos do feijão, NVP = número de vagens por planta, UG = unidade gravimétrica, UV = unidade volumétrica, P = fósforo, pH = potencial hidrogeniônico; ^(b) esf = esférico, gau = gaussiano; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial

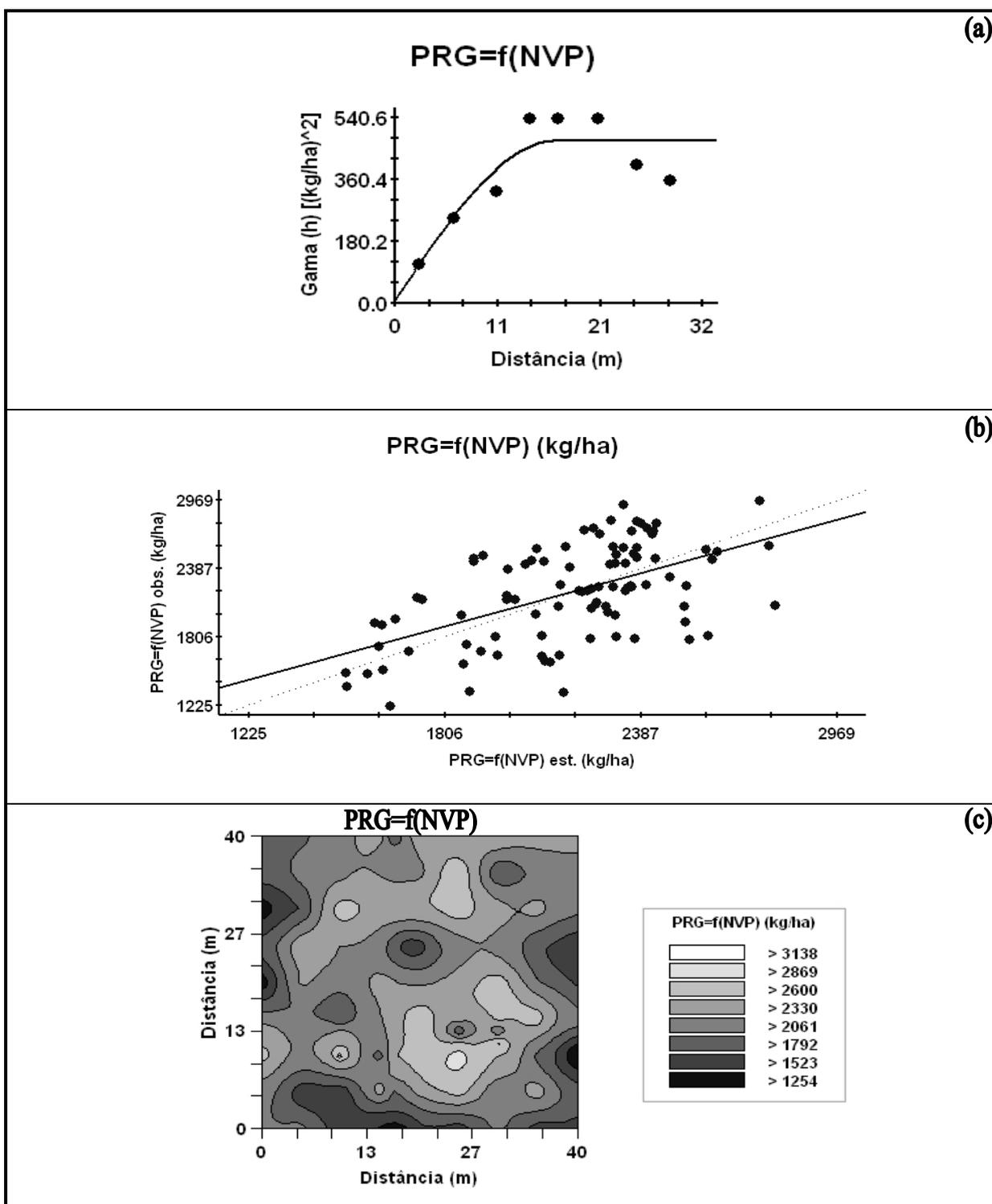


Figura 31: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do NVP em um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

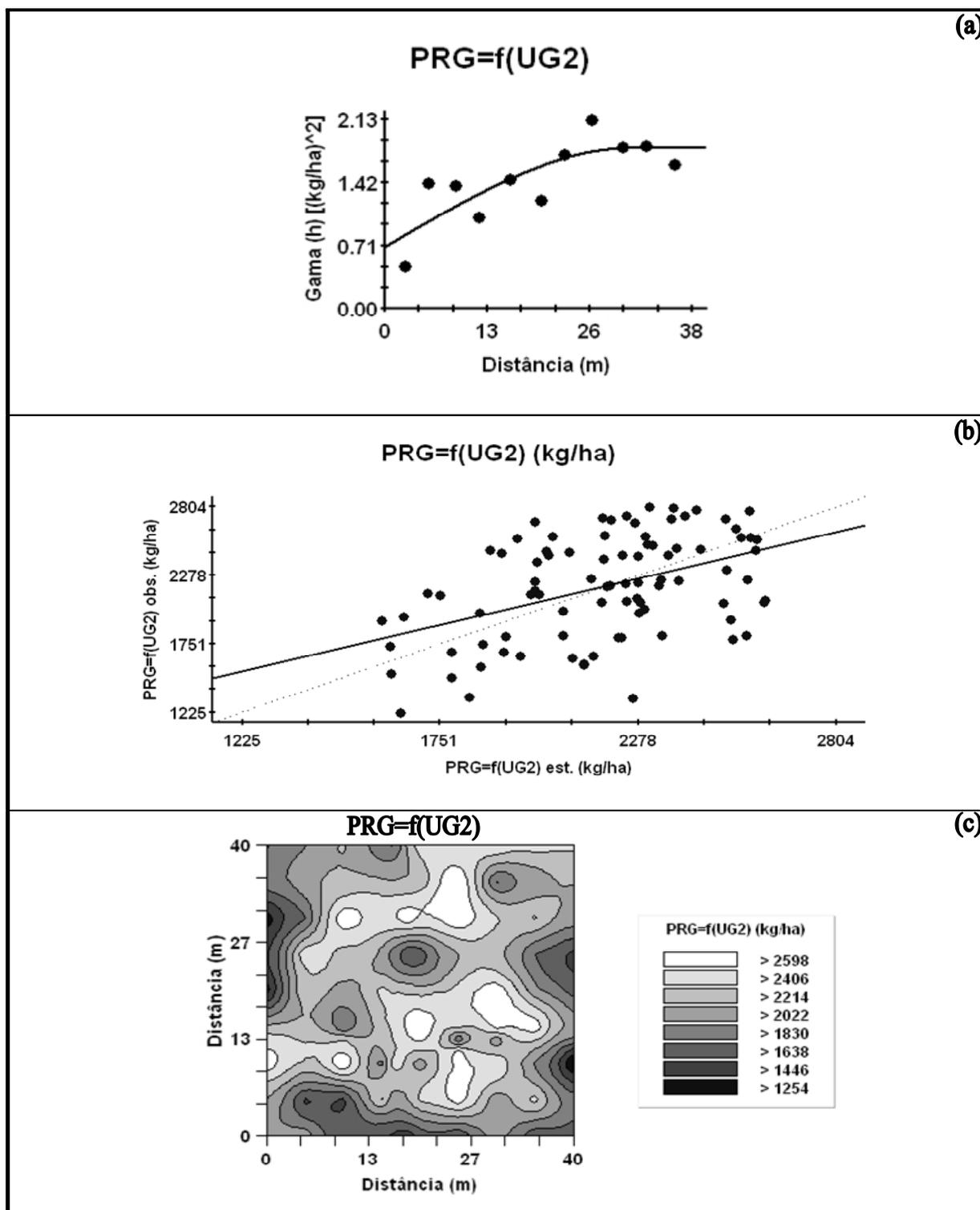


Figura 32: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função da UG2 de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

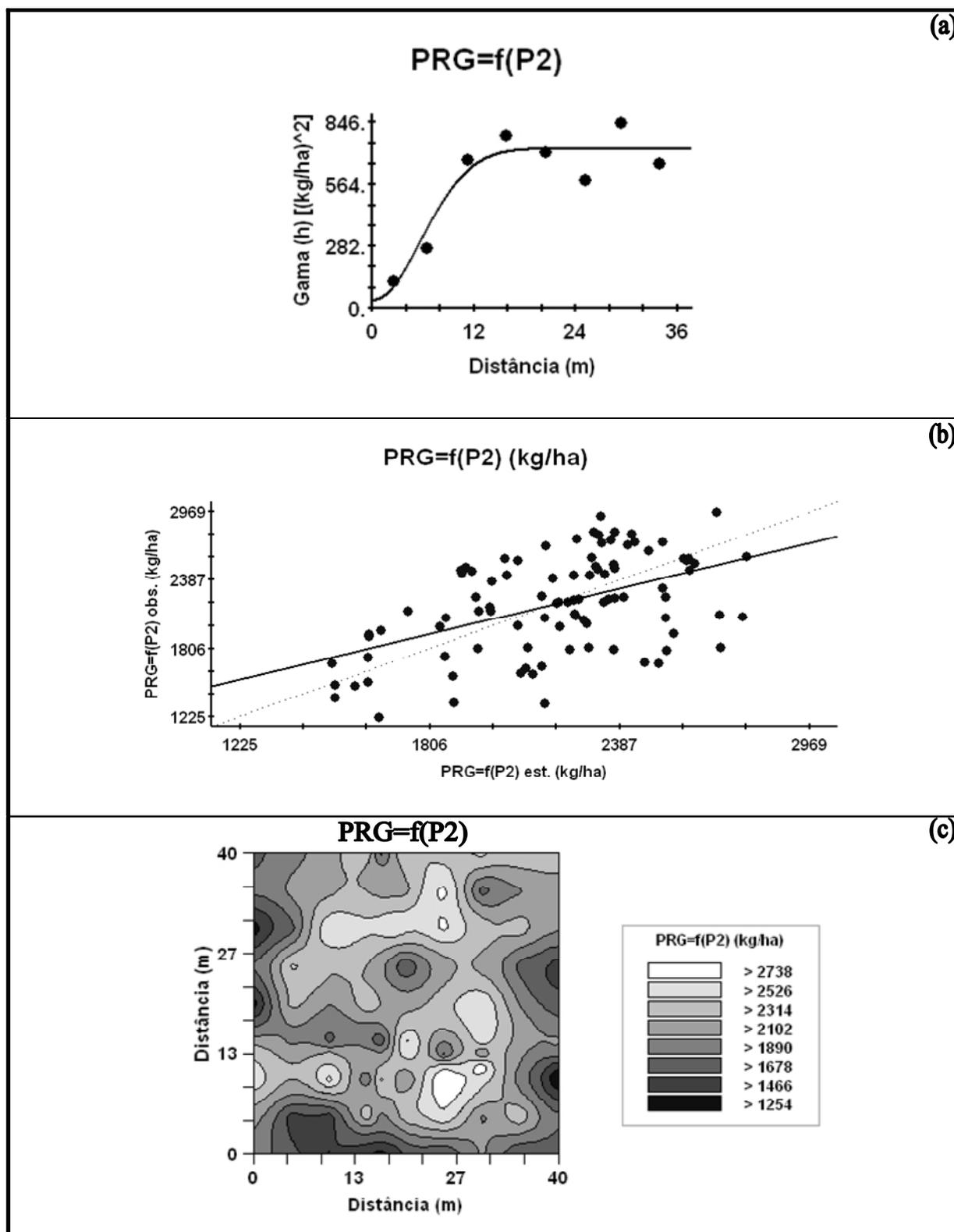


Figura 33: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do P2 de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

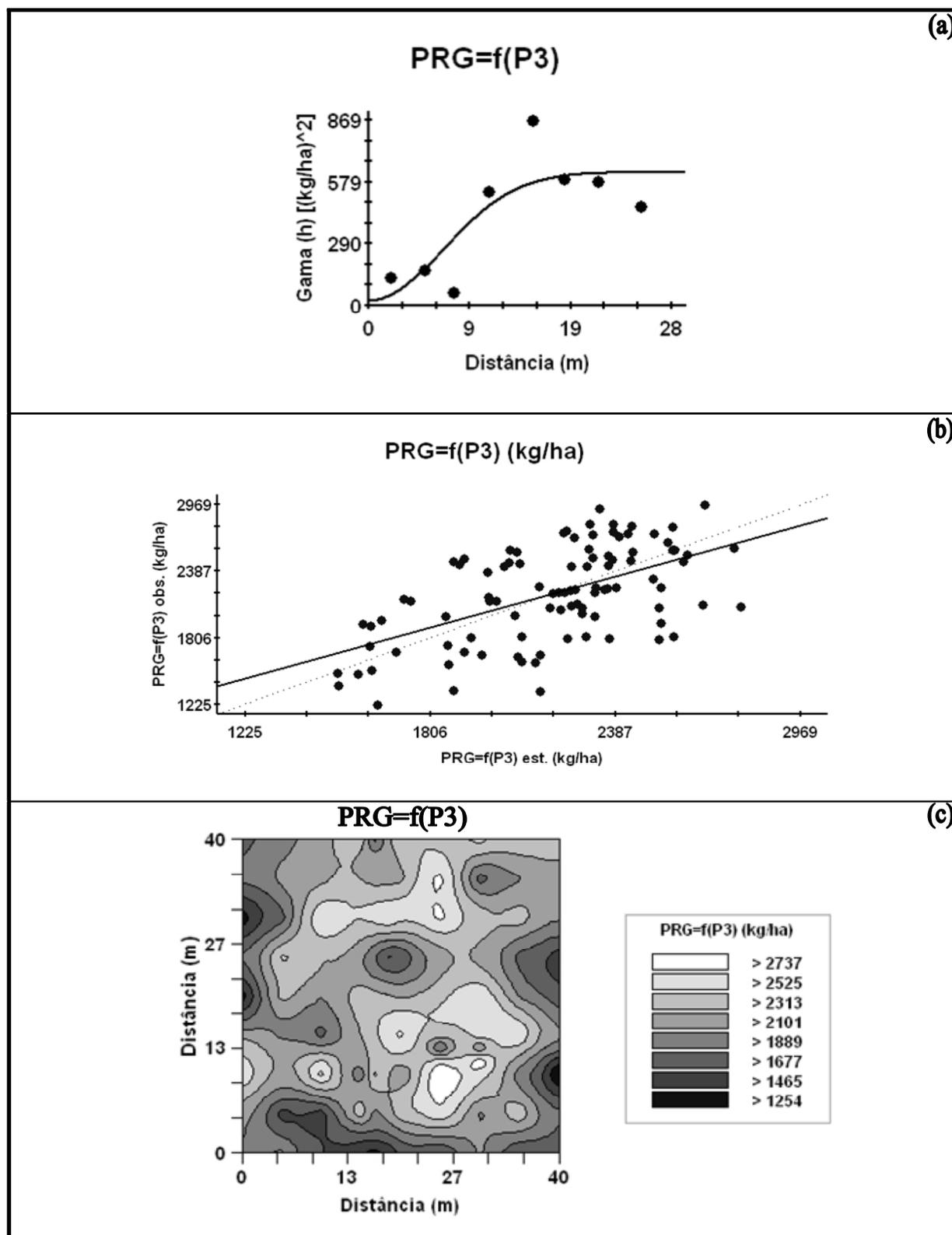


Figura 34: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do P3 de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **de plantio direto**

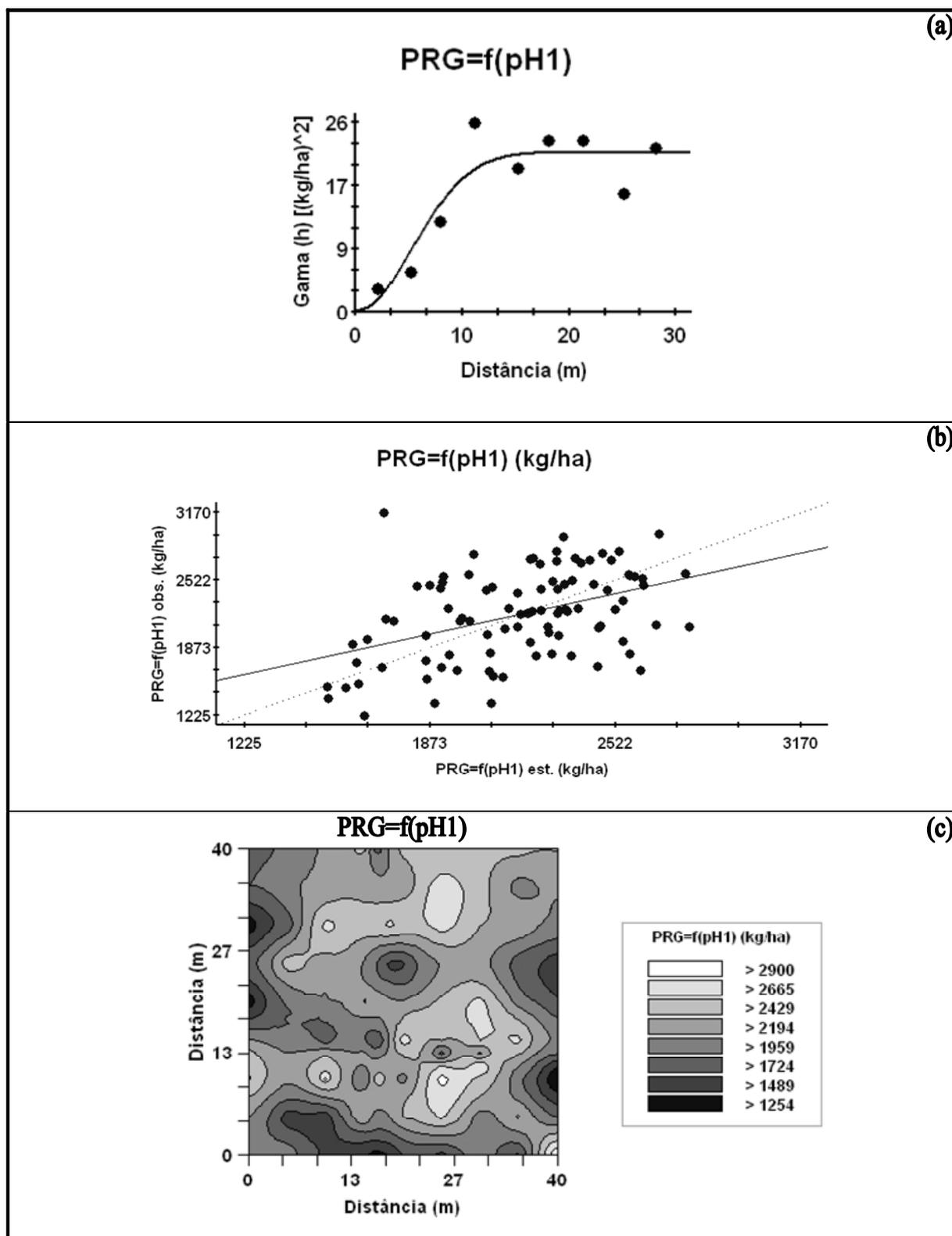


Figura 35: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade do feijão em função do pH1 de um Latossolo Vermelho Distroférico sob **plantio direto**

5 CONCLUSÕES

Face ao exposto, o presente estudo, realizado num Latossolo Vermelho Distroférico sob o sistema cultivo mínimo e o plantio direto, estabelecido no município de Selvíria (MS), com os materiais e métodos empregados, e em decorrência dos resultados obtidos, analisados e interpretados, possibilitou as seguintes conclusões:

- 1) Em relação ao sistema cultivo mínimo do solo, no sistema plantio direto ocorreu um aumento da heterogeneidade dos atributos da planta. Já em relação aos do solo, um aumento da homogeneidade,
- 2) A menor produtividade de grãos do feijoeiro, ocorrida no sistema cultivo mínimo do solo, foi provavelmente devido a uma menor população de plantas que esse sistema proporcionou,
- 3) Ainda que no sistema plantio direto o solo cultivado estivesse mais compactado, evidenciado sobretudo pelos maiores valores da densidade do solo, resistência à penetração e umidade volumétrica, nele ocorreu uma maior e significativa produtividade de grãos do feijoeiro,
- 4) A produtividade de grãos do feijoeiro pôde ser explicada, para o sistema cultivo mínimo do solo e o sistema plantio direto, por modelos matemáticos de elevada significância, respectivamente dados em função da porosidade total e da densidade da partícula do solo, e
- 5) Espacialmente falando, apenas para o sistema plantio direto, a produtividade de grãos do feijoeiro pôde ser estimada por meio da co-krigagem com o valor do pH do solo. Assim, valores do pH na faixa de 5,0-5,4 indicaram sítios com as mais

elevadas produtividades de grãos do feijoeiro, estabelecidas entre 2200-2600 kg ha⁻¹.

6 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTANELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.19, p.115-119, 1995.

ALBUQUERQUE, M. P.; COELHO, R. S. B.; PEREZ, J. O. Avaliação de linhagens e cultivares de caupi (*Vigna unguiculata*) em relação a *Fusarium oxysporum* f.sp. *tracheiphilum*. **Caderno Omega** – Série Agronomia v.12, p.5-7. 2001.

ALMEIDA, V. P.; ALVES, M. C.; DA SILVA, E. C.; OLIVEIRA, S. A. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo Vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, p.1227-1237, 2008.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, n.4, p.695-702, 2001.

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, p.1003-1011, 2003.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N.; JUCKSCH, I. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, p.867-874, 2000.

ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VIZOTTO, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.18, p.139-145, 1994.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região do Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 643-650, 1997.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p.495-504, 2003.

ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118 f. Tese (Doutoral) – Faculdade de Ciências, Universidade Da Coruña, La Coruña.

ARSHAD, M. A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. **Soil Science Society of America**, Madison, n.49, p.123-141, 1996. (Special Publication, 49).

BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I. H.; TIESSEN, H.; STEWART, W. B. Short and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 1027-1034, 1993.

BANNO, K. Oferta e comercialização de feijão no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE PRAGAS, DOENÇAS E PLANTAS DANINHAS DO FEIJOEIRO, 5, 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1994. p.27-44.

BARIZON, R.R.M. **Calagem na superfície para a cultura da soja, em semeadura direta sobre (*Brachiaria brizantha*)**. 2001. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BAVER, L. D. **Física de suelos**. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973. 529p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. ; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.

BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Cap. 2, p. 1-636.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1**. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 377-382.

BRAGA, L.; DRUCK, S. Analysis of soil properties by geostatistical methods. Geostatistical for next century. In: AN INTERNATIONAL FORUM IN HONOR OF MICHEL DAVID'S CONTRIBUTION TO GEOESTATISTICS, 1993, Montreal, Quebec, Canada. **Proceedings...** Montreal: s.n., 1993.

BRAUNACK, M. V.; DEXTER, A. R. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. Properties of agregates and beds of aggregates. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.14, p.259-279, 1989.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1424-1431, 1994.

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O' SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. ; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2001. p.377-403.

BERG, M.V.D.; OLIVEIRA, J.B. Variability of apparently homogeneous soils capes in São Paulo state, Brazil: I. Spatial analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n.2, p.377-391, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria , v.34, n.2, p.365-371, 2004.

BEZERRA, C. R. DE F. **Variabilidade espacial da produtividade de forragem do milho safrinha em função de atributos químicos do solo**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially-variable liming rates - a method for determination. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.

BISSANI, C. A.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. Cap. 6, p. 1-290.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: 1979.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; et al. Influência de formas de relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, n.6, p.1749-1755, 2006.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Comp.). **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A.B. Optimal interpolation and isarithm mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.4, p.643-659, 1981.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J. Yates, S. R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.1/3, p.311-326, 1994.

BURROUGH, P.A. et al. Using public domain geostatistical and GIS software for spatial interpolation. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, Falls Church, v.62, n.7, p.845-854, 1996.

BUZETTI, S.; ROMEIRO, P. J. M.; ARF, O.; SÁ, M. E. de GUERREIRO NETO, G. Efeito da adubação nitrogenada em componentes da produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em diferentes densidades, **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v.1, n.1, p.11-19, 1992.

CALEGARI, A. Manejo de adubação verde. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROTAÇÃO DE CULTURAS, Campo Mourão. **Anais...** Campo Mourão, v.2, p.104-116, 1993.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J.G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistema tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, p.27-40, 1999.

CAMARGO, A. M. M. P.; CASER, D. V. e FRANCISCO, V. L. F. S. Previsões e estimativas das safras agrícolas no Estado de São Paulo. **Informações Economicas**, São Paulo, v.31, p.101-117, 2001.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.69-90.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico hídrico de um Podzóllico Vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.34, n.2, p.257-265, 1999.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002a.

CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.5, p.1353-1361, 2002b.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p.765-771, 2006.

CASTRO FILHO, C.; MUZILI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v.22, p.527-538, 1998.

CASSEL, D. K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: UNGER, P. W.; VAN DOREN Jr., D. M. (Ed.). **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.45-68.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e da cultura. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.249-290, 2003.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo Vermelho induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, p.933-942, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Feijão total (1ª, 2ª e 3ª Safra):** quadro comparativo de área, produção e produtividade, safras 2006/2007 e 2007/2008 - 8º levantamento. Maio 2008. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em: 15 dez. 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Consolidado e acompanhamento da safra 2006/2007:** 1º levantamento. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 24 jul. 2008.

CORÁ, J. E. **The potencial for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tiilage**. Michigan, 1997, p.104.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v.28, p.1013-1021, 2004.

COUTO, E.G. **Variabilidade espacial de propriedades do solo influenciado pela agricultura em escala regional e local no sul do estado do Mato Grosso**. 1997. 183 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CRISTÓBAL, A.; PALACIOS, V.; RUIZ, F. Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo. **Agrociência**, Havana, v.30, n.2, p.329-343, 1996.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

CULLEY, J. L .B.; LARSON, W. E; RANDALL, G. W. Physical properties of a typic Haplaquoll under conventional and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1583-1587, 1987.

DALLMEYER, A. U. **Avaliação energética e desempenho operacional de equipamentos de preparo do solo**. 1994. 168 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

DA ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, J. E.; PETRERE, C.; CADORE, M. A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p.241-247, 1997.

DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: PRIBAM MINING CONGRESS, 1970, Praga. **Proceedings of the...** Praga: S.n., 1970. p.91-109.

DAVIS, J. C. **Statistics and analysis in geology**. 2 ed. New York: John Wiley, 1986. 646 p.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e do sistema radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.703-709, 1999.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1980. 44p.

DERPSCH, R. Adubação verde e rotação de culturas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Fundação ABC, v.3, p.85-104, 1985.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, V. **Controle de erosão no Paraná, Brasil:** sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit/Instituto Agrônômico do Paraná, 272p., 1991.

DELHOMME, J.P. **Kriging in hydrosciences.** Fontainebleau, Centre D'Informatique Géologique, 1976. 94p.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **Geostatistical software library and user's guide, GSLIB.** New York: Oxford University Press, 1997. 363p.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. **GSLIB:** geostatistical software library and user's guide, New York: Oxford University, 1998. 369p. (1 CD-ROM).

DIAS, JÚNIOR, M. S. ;PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.175-182, 1996.

DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.;STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for asustainable environment.** Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994.

ELTZ, F.L.P. et al. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas Propriedades físicas e químicas de um latossolo brunóalco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.259-267, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa–CNP.Solos, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E.; BLOON, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2.ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2.ed. New York: M. Decker, 1997. 624p.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, n.17, p.2675-2682, 1998.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, n.11, p.1419-1424, 2001a.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. **Influência do pH na produtividade do feijoeiro no sistema plantio direto em solo do cerrado**. Disponível em: <www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2000.pdf>. acesso em: 29 set. 2008.

FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T; DE MARIA, I. C. ; FURLANI, A. M. C. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1998. (Boletim técnico, 200).

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M. SILVA, S. W.; SEDYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, p.1097-1104, 2003.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D.; MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição

dos poros em dois solos (Typic Argioquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.329-333, 1983.

FNP-CONSULTORIA & COMERCIO. **Anuário da Agricultura Brasileira – AGRIANUAL 2007**. Feijão. São Paulo, 2007. (Agrianual, 2007).

FOLLE, S. M.; SEIXAS, J. M. Mecanização agrícola, In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: NOBEL/Embrapa-CPAC, 1986.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.38, n.8, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial da produtividade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) sob preparo convencional e plantio direto**. 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférrico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.27, n.1, p. 61 – 67, 2005.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CARVALHO, G. J. VERONESE JUNIOR, V. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.113-121, 2006.

FORSYTE, W.; LEGARDA, L. Critérios de água y espacio aéreo del suelo para producción máxima del frijol 27-R. In. PROGRAMA COOPERATIVO CENTROAMERICANO PARA EL MEJORAMIENTO DE CULTIVOS ALIMENTICIOS, 19, 1973, San José. **Memoria...** Guatemala: IICA, Zona Norte, 1973.

FORSYTE, W. **Física del suelos: manual de laboratório**. Costa Rica: Iica, 1985. 212 p.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 321p.

FURLANI, C. E. A. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*-L.)** 2000. 218 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômica, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

FURLANI, C. E. A.; GAMERO, C. A. Produtividade da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*-L.) em diferentes sistemas de preparo do solo e manejos da cobertura de inverno. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.16, n.3, p.7-19, 2001.

FURTADO, M. B.; BICUDO, S. J.; PAZ GONZÁLEZ. Propriedades químicas de um Nitossolo Vermelho distroférico sob diferentes manejos. In: LIBRO DE RESÚMENES DEL CONGRESO SOBRE USO Y MANEJO DEL SUELO, 2, 2008, La Coruña. **Anais...** La Coruña: UMS, 2008. p.35.

GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A. C. S.; STROHHAECKER, L.; HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.953-957, 2000.

GASTON, L. A.; LOCKE, M. A.; ZABLOTOWICZ, R. M. e REDDY, K. N. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.65, p.449-459, 2001.

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p.477-484, 2004.

GERARD, C.J.; MEHTH, H.C.; HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. **Soil Science**, Baltimore, v.114, p.37-49, 1972.

GONÇALVES, A. C. C.; MATA, J. D. V.; VIEIRA, S. R.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de produtividade e de resistência à penetração em área irrigada, sob dois sistemas de preparo. In: AVANCES EM EL MANEJO DEL SUELO Y AGUA EM LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA, 1998, La Plata. **Anais...** La Plata: UNLP, 1998. p.113-119.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.155-164, 1999.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.32, p.180-186, 1968.

GS⁺: **Geostatistics for environmental sciences**. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 89 f. Tese (Doutorado em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

HAKKANSON, I.; VOORHEES, W.; B., RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compactation and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.

HENKLAIN, J. C. Efeito do preparo sobre característica do solo. In PEIXOTO, R. T. G.; AHRENS, D. C.; SAMAHA, M. J. **Plantio Direto: o caminho para uma agricultura sustentável**. Ponta Grossa: Instituto Agrônômico do Paraná, p.206-221, 1997.

HERMAWAN, B.; CAMERON, K. C. Structural changes in a silt loam under long-term conventional or minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.26, p.139-150, 1993.

HILL, R. L.; CRUSE, R. M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisoils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, p.1270-1273, 1985.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HODGSON, A. S.; MACLEOD, D. A. Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a Vertisol. **Soil Science American Journal**, Madison, v.53, p.355-361, 1989.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733p.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA. **Produtividade média do feijão para o Estado de São Paulo**. Disponível em: <www.iea.sp.gov.br/alt/banco/menu.php>. acesso em: 24 jul. 2008.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.11-18, 2001.

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

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G.; ROCHA, J. V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavél, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p.212-219, 2004.

JOURNEL, A.G. Geostatistical for conditional simulation of orebodies. **Economic Geology**, Lancaster, v.69, p.673-687, 1974.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1991. 600p.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.19, n.3, p.395-401, 1995.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p.361 -369, 2007.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo fundo: Embrapa trigo, 2000. 20p.

KUIPERS, H. Agronomic aspects of ploughing and no-ploughing. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.21, p.341-343, 1991.

KUNISHI, H. M.; BANDEL, V. A.; MULFORD, F. R. Measurement of available soil phosphorus under conventional and no-till management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 13, n. 8, p. 607-618, 1982.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora da Unesp, 1998. 226p.

LEÃO, M. G. A. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de frutos cítricos**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.1-12, 1996.

LIMA, C. G. R. **Correlação linear e espacial da produtividade de forragem de milho com atributos físicos de um latossolo vermelho distrófico**. 2007. 107f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p.1233 -1244, 2007.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Potafós, 1983. 162p.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2004. 209p.

MAEDA, S.; MENDONÇA, A. L. **Épocas de semeadura: a cultura do feijão no Mato Grosso do Sul**. Dourados: EMBRAPA, 1990. p. 39-40. (Circular, 17).

MANZIONE, R. L. **Variabilidade especial de atributos químicos do solo em Araguari – MG**. 2002. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

MARINS, A. C. **Métodos de estimação da função semivariância aplicados a dados simulados e reais de produtividade da soja e de atributos físicos de um Latossolo**. 2006. 140 f. Dissertação: (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

MARTINS, M. V. **Aspectos lineares e espaciais da correlação entre a produtividade de feijão (*Phaseolus vulgaris* L) com atributos físicos do solo**. 2007. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1985.

McBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, p.866-870, 1979.

MARTINS, M. V.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul, **Acta Scientiarum Agronomic**, Maringá, v.31, p.147-154, 2009.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique appliquee**. Technip: Memories Du Bureau De Recherches Geologiques Et Minières, 1962. Tome 1 and 2.

MEGDA, M. M.; CARVALHO, M. P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um latossolo vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p.781-788, 2008.

MELO FILHO, J. F. et al. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo coeso dos tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p.199-205, 2006.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Ceres**, Lavras, v.12, n.3, p. 211-220, 2006.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p.1149-1159, 2003.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; CORRENTE, J. E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 1, p.35-44, 2003.

MEURER, E. J.; RHEINHEMEIR, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, E. J., ed. **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, p.117-162, 2006.

MILLER, M.P.; SINGER, M. J.; NIELSEN, D. R. Spacial variability of weat yield and soil proprieties on complex hills. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.52, p.1133-1141, 1988.

MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, p.1266-1272, 2008.

MORAES, W. V. **Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivos**. 1984. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Universidade Federal de Minas Gerais, Lavras, 1984.

MIRANDA, I. S. Estrutura do estrato arbóreo do cerrado amazônico de Alter do Chão, **Revista Brasileira de Botânica**, Belém, v.16, p.143-150, 1993.

MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystems e Environment**, Amsterdam, v.38, n.2, p.301-311, 1992.

MUZILLI, O. O plantio direto no Brasil. In: FANCELLI, A. L., TORRADO, P. V., MACHADO, J. (Coord.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargil, p.3-16, 1985.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. IV – Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: relação solo-planta**. Viçosa: UFV, 2007. Cap. 4, p. 133-204.

OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G.; HUE, N. V.; van NOORDWIJK, M.; ROBERTSON, G. P., WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN et al. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Hawaii: University of Hawaii, 1989. p. 69-95.

OLIVEIRA, J. B.; MONIZ, A. C. Levantamento pedológico detalhado da Estação Experimental de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Piracicaba, v.34, n.2, p.59-114, 1975.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO - FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org>> Acesso em: 10 abr. 2007.

ORLANDO, R. C. et al., Análise de variabilidade do índice de cone para diferentes níveis de teor de água do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.3, p.268-270.

PENA, Y. A.; GOMES, A. S.; SOUZA, R. O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.517-523, 1996.

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

PIMENTEL-GOMES, F. P., GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

POMPEU, A. S. **Melhoramento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. In: BULISANI, E. A.(Coord.). **Feijão fatores de produção e qualidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.1-28.

PONTES, J. M. **A geoestatística: aplicações em experimento de campo**. 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

PRIMAVESI, A. **O manejo ecológico do solo**. 4.ed. São Paulo: Nobel, 1982. 541p.

PREVEDELLO, C. L. O solo como um sistema multicomponente e suas relações massa-área-volume. In: PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996. Cap. 2, p. 32.

RAIJ, B. van. et al. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

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. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 2, p. 49-135.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E. J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.22, n.4, p. 713-721, 1998.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHIONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, n.1, p.151-160, 2001.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D. P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília: Mec/Esal/Potafos, 1988. 81 p.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4.ed. Viçosa: Neput, 2002. 338 p.

ROBAINA, F.G.; SEIJAS, T.L. Distribución espacial de la conductividad hidráulica de saturación en un área cañera de la llanura Habana-Matanzas. **Revista Ciência Técnica Agropecuária**, Havana, v.11, n.1, p.71-76, 2002.

ROBINSON, G. W. **Los suelos**: su origen, constitución y clasificación. Barcelona: Omega, 1960. 515 p.

ROBINSON, F. E. Required per cent air space for normal growth of sugar cane. **Soil Science**, Baltimore, n.98, p. 206-207, 1964.

ROSA FILHO, G. **Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto**. 2008. 89f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.33, n.2, p.283-293, 2009.

SALVIANO, A. A .C., VIEIRA, S. R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.22, p.115-22, 1998.

SANTOS, P. A.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAG, E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica a penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p.287-295, 2005.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; RAPASSI, R. M. A.; MURAISHI, C. T.; MALLER, A.; MATOS, F. A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* – L.)

e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum**, Maringá, n. 3, v. 28, p. 313-321, 2006.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v.52, p.591-611, 1965.

SCHUMACHER, T. E.; SMUCKER, A. J. M. Mechanical impedance effects on oxygen uptake and porosity of drybean roots. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, p.51-55, 1981.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 23-34, 1997.

SILVA, L. M. V.; PASQUAL, A. Dinâmica e modelagem da matéria orgânica do solo com ênfase ao ecossistema tropical. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.14, n.3, p.13-24, 1999.

SILVA, A. R. B. **Comportamento de variedades/híbridos de milho (*Zea mays* L.) em diferentes tipos de preparo de solo**. 2000. 95f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

SILVA, A. P. et al. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H. et al. (Comp.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo - sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. Cap. 1, p. 1-20.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, 2004.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, Á. L.; ALBUQUERQUE, J. A. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.544-552, 2005.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. VI - Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: matéria orgânica**. Viçosa: UFV, 2007. Cap. 6, p. 275-356.

SILVA, M. G.; ARF, O.; ALVES, M. C.; BUZETTI, S. Sucessão de culturas e sua influência nas propriedades físicas do solo e na produtividade do feijoeiro de inverno irrigado, em diferentes sistemas de manejo do solo. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.2, p.335-347, 2008.

SILVEIRA, P.M.; CUNHA, A.A. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um latossolo submetido a sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.37, n.9, p.1325-1332, 2002.

SIQUEIRA, R. **Sistema de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais do solo**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

SIQUEIRA, R. Sistemas de preparo do solo e plantio direto. In: MORAES, M. H. et al. (Comp.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo - sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. Cap. 1, p. 1-20.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.203-211, 2008.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 81p.

SORATTO, R. P. **Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo da água e parcelamento da adubação nitrogenada.** 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Ed.). **Soil compaction in crop production.** Netherlands: Elsevier, 1994. p.1-21.

SOUZA, L.S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo.** 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.21, p.367-372, 1997.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio, e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.22, p.77-86, 1998.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.699-707, 2001.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.1, p.133-139, 2003.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.6, p.1067-1074, 2003a.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.486-495, 2003b.

SOUZA, Z. M. **Variabilidade espacial e atributos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo**. 2004. 153 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p.51-58, 2004.

SOUZA, Z. M., CAMPOS, M. C. C., CAVALCANTE, Í. H. L. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, 2006.

SOUZA, D. M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V – A acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: a acidez do solo e sua correção**, Viçosa, 2007. Cap. 5, p. 205-274.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.15, p.229-235, 1991.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, Baltimore, v.96, p.153-156, 1963.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, p.45-94, 1985.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.22, p.573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; MOURÃO JÚNIOR, M. **Proriedades físicas de um Latossolo Vermelho – Escuro sob mata nativa e sistemas de produção de café orgânico, em conversão e convencional**. 2002. Disponível em: <<http://www.planetaorganico.com.br/trabVanessa2.htm>>. Acesso em 10 jul. 2008.

THUNG, M. D. T.; OLIVEIRA, I. P. **Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa-CNPAP, 1998. 172p.

TREIN, C. R. et al. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, MG, v.15, n.1, p.105-111, 1991.

TSUNECHIRO, A.; FERREIRA, C. R. R. P. T. O poder aquisitivo dos produtores de feijão para compra de fertilizantes. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 24, n.6, p. 51-60, 1994.

UGOLINI, D. C.; EDMONDS, R. L. Soil biology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. **Pedogenesis and soil taxonomy**. (Ed.). I. concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier Science, 1983. p. 193-231.

UNGER, W.P.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p.759-766, 1994.

VERONESE JUNIOR., V.; CARVALHO, M. P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O. S.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; INGARAMO, O. E. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.85, p.166–177, 2006.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, 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**, Berkeley, v.51, n.1, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. V.1, p.1-53.

WANDER, A. E. **Cultivo do feijão irrigado na região Noroeste de Minas Gerais**. Embrapa Arroz e Feijão. Sistemas de produção, n.5, versão eletrônica, 2005. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/FeijãoIrrigadoNoroe>>. Acesso em: 25 jul. 2008.

WEBSTER, R. Is soil variation random. **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p.149-163, 2000.

WÜRSCHÉ, W.; DENARDIN, L. E. Císervação e manejo dos solos – I. Planalto Rio-grandense. Considerações gerais. **Circular Técnica Nacional de Pesquisa do Trigo**, Passo Fundo, n.2, p.1-20, 1980.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do

feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n.3, p.621-633, 2000.

WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SHIMANDEIRO. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.338-343, 2005.

WESSELING, J.; VAN WIJK, W. R. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: LUTHIN, J. N. (Ed.). **Drainage of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1957. p. 461-472. (Agronomic Series, 7).

YOST, R.S.; UEHARA, G.; FOX, R.L. Geoestatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.5, p.1028-1032, 1982.

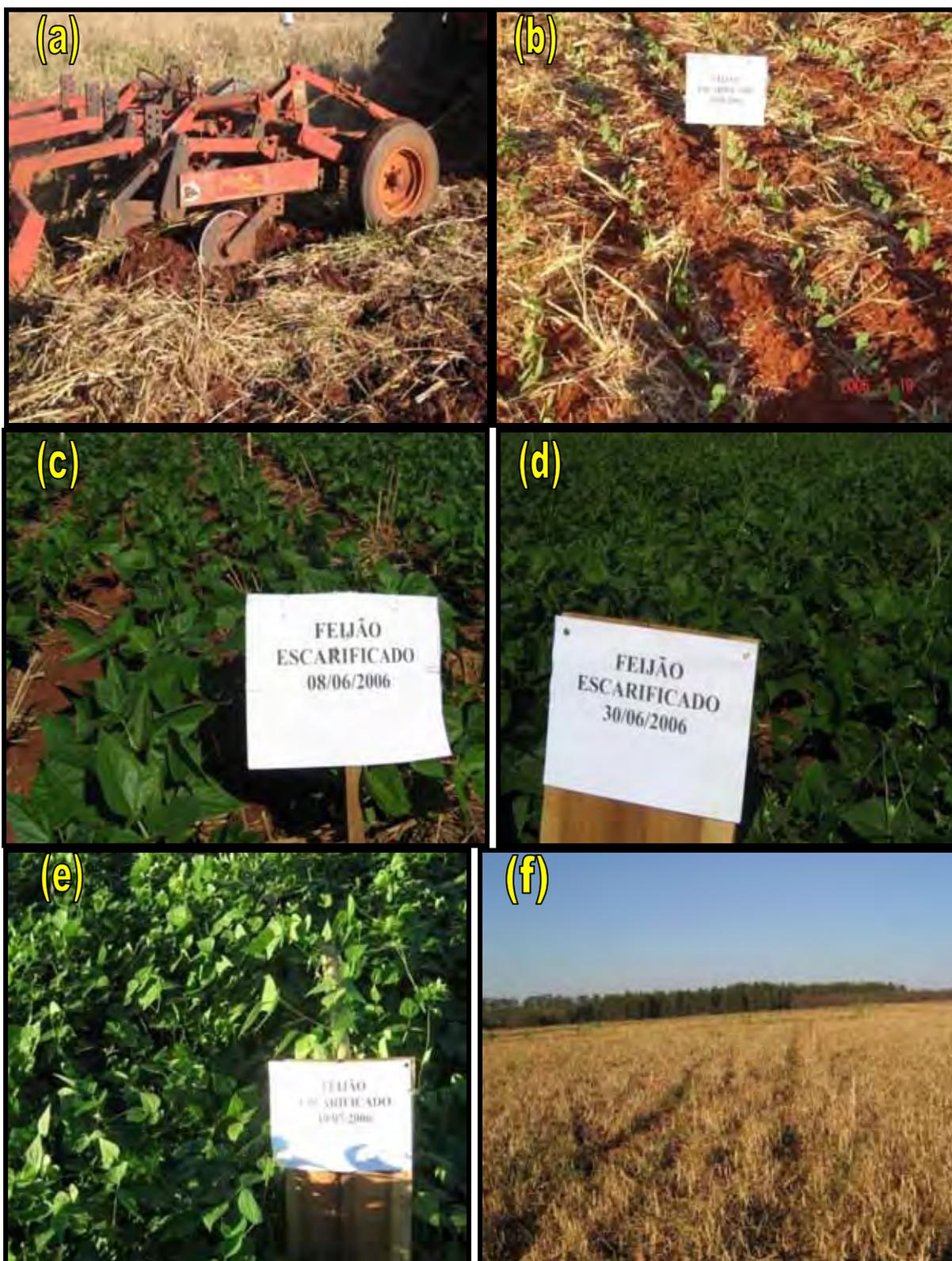
ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.4, p.1000-1007, 2007.

ZECH, Z. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1, p.69-116, 1997.

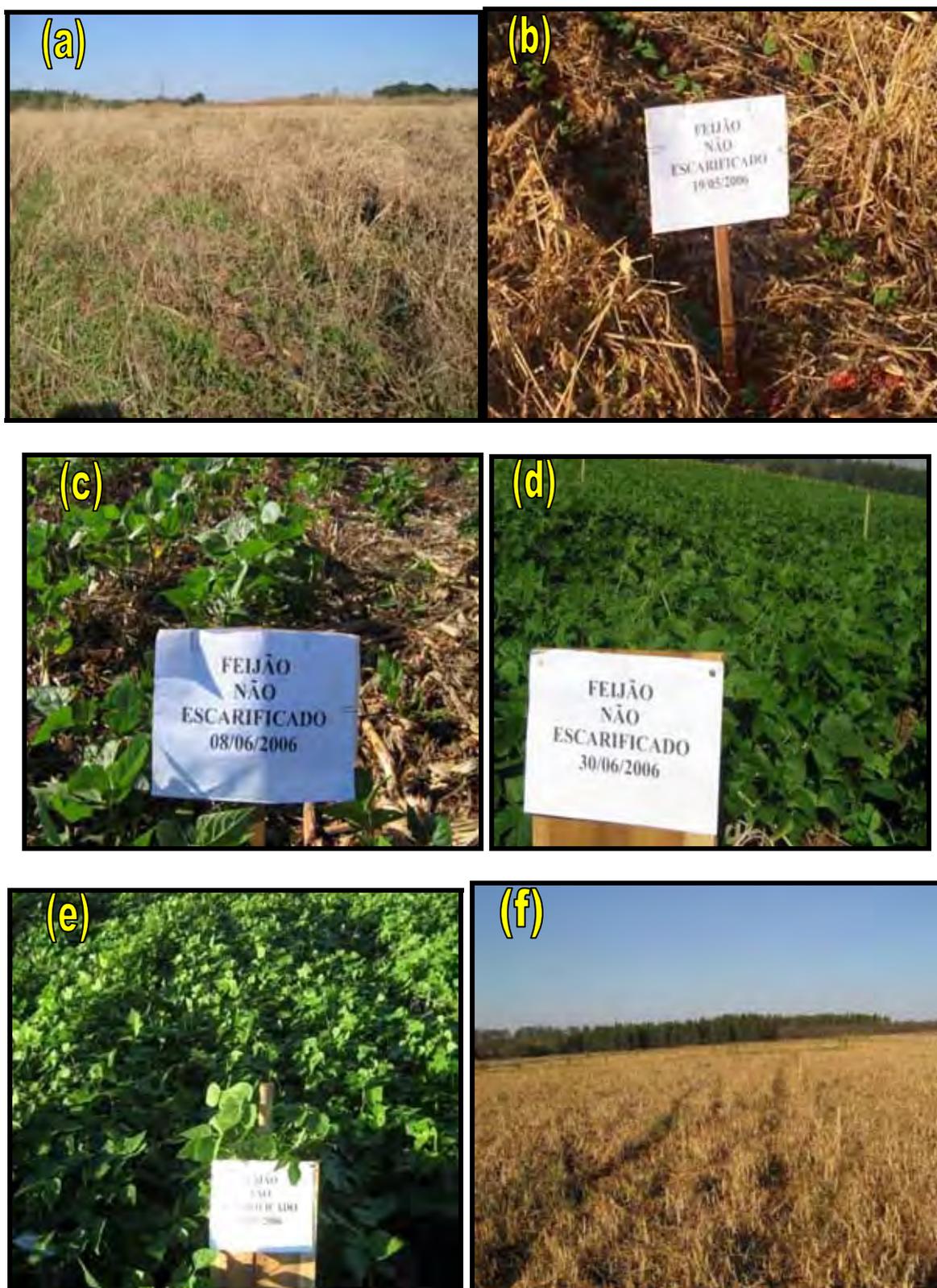
7. APÉNDICE



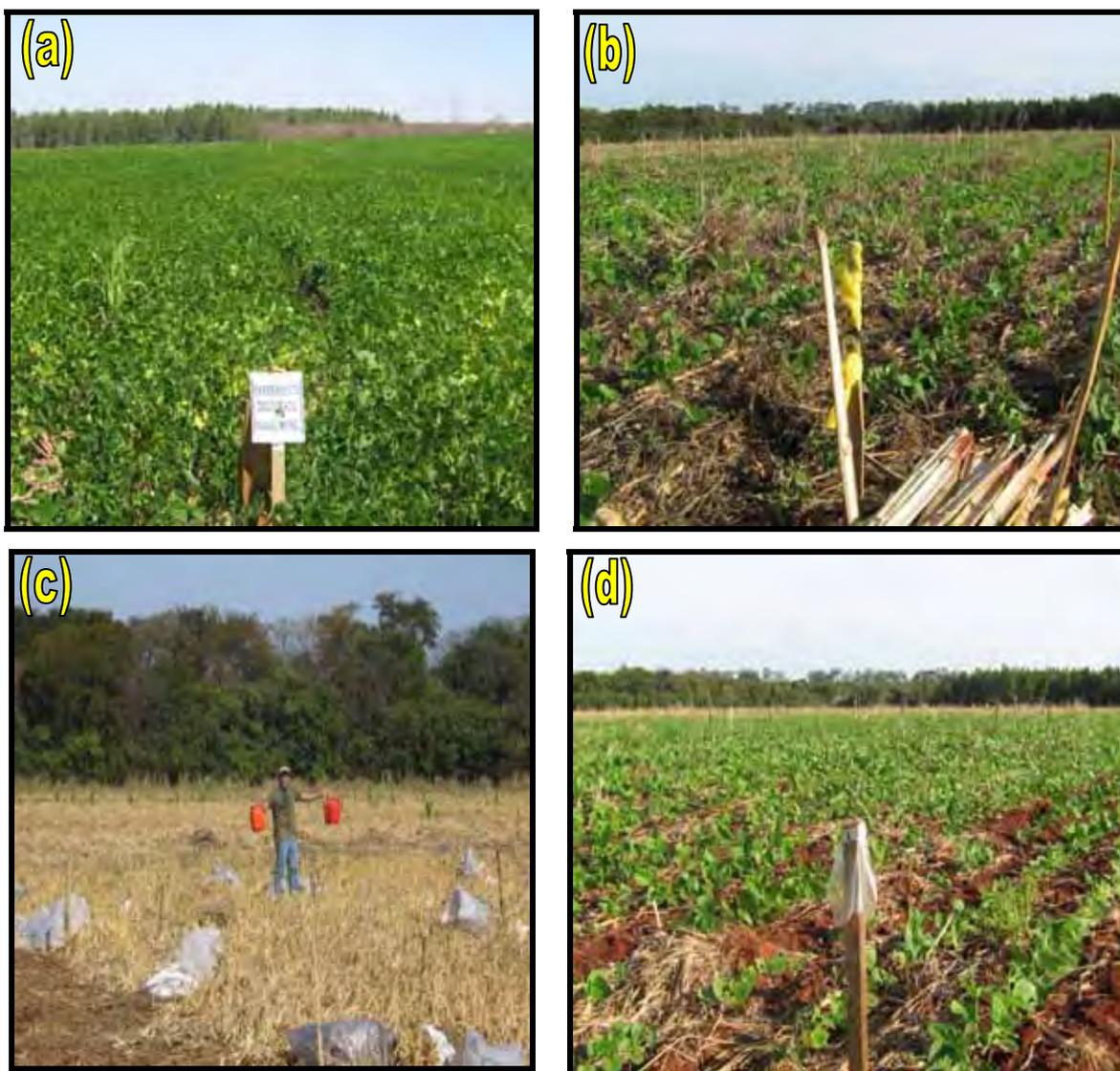
APÊNDICE A. (a) Área experimental antes da implantação do experimento; (b) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência à penetração, e (d) Coleta de amostras deformadas do solo.



APÊNDICE B. (a) Instalação do experimento; (b) 14 DAS (c) 34 DAS; (d) 56 DAS; (e) 66 DAS, e (f) Experimento colhido sob **cultivo mínimo**.



APÊNDICE C. (a) Instalação do experimento; (b) 14 DAS (c) 34 DAS; (d) 56 DAS; (e) 66 DAS, e (f) Experimento colhido sob **plantio direto**.



APÊNDICE D. (a) 80 DAS; (b) Estaqueamento da malha, 26 DAS; (c) Dia da colheita, 98 DAS; (d) Área colhida de 3,24m².

ID	X	Y	ID	X	Y	ID	X	Y
1	0,00	0,00	41	35,00	11,67	81	25,00	25,00
2	5,00	0,00	42	40,00	11,67	82	30,00	25,00
3	10,00	0,00	43	0,00	13,34	83	35,00	25,00
4	15,00	0,00	44	5,00	13,34	84	40,00	25,00
5	16,67	0,00	45	10,00	13,34	85	0,00	30,00
6	18,34	0,00	46	15,00	13,34	86	5,00	30,00
7	20,00	0,00	47	20,00	13,34	87	10,00	30,00
8	25,00	0,00	48	25,00	13,34	88	15,00	30,00
9	30,00	0,00	49	30,00	13,34	89	16,67	30,00
10	35,00	0,00	50	35,00	13,34	90	18,34	30,00
11	40,00	0,00	51	40,00	13,34	91	20,00	30,00
12	0,00	5,00	52	0,00	15,00	92	25,00	30,00
13	5,00	5,00	53	5,00	15,00	93	30,00	30,00
14	10,00	5,00	54	10,00	15,00	94	35,00	30,00
15	15,00	5,00	55	15,00	15,00	95	40,00	30,00
16	16,67	5,00	56	16,67	15,00	96	0,00	35,00
17	18,34	5,00	57	18,34	15,00	97	5,00	35,00
18	20,00	5,00	58	20,00	15,00	98	10,00	35,00
19	25,00	5,00	59	25,00	15,00	99	15,00	35,00
20	30,00	5,00	60	30,00	15,00	100	16,67	35,00
21	35,00	5,00	61	35,00	15,00	101	18,34	35,00
22	40,00	5,00	62	40,00	15,00	102	20,00	35,00
23	0,00	10,00	63	0,00	20,00	103	25,00	35,00
24	5,00	10,00	64	5,00	20,00	104	30,00	35,00
25	10,00	10,00	65	10,00	20,00	105	35,00	35,00
26	15,00	10,00	66	15,00	20,00	106	40,00	35,00
27	16,67	10,00	67	16,67	20,00	107	0,00	40,00
28	18,34	10,00	68	18,34	20,00	108	5,00	40,00
29	20,00	10,00	69	20,00	20,00	109	10,00	40,00
30	25,00	10,00	70	25,00	20,00	110	15,00	40,00
31	30,00	10,00	71	30,00	20,00	111	16,67	40,00
32	35,00	10,00	72	35,00	20,00	112	18,34	40,00
33	40,00	10,00	73	40,00	20,00	113	20,00	40,00
34	0,00	11,67	74	0,00	25,00	114	25,00	40,00
35	5,00	11,67	75	5,00	25,00	115	30,00	40,00
36	10,00	11,67	76	10,00	25,00	116	35,00	40,00
37	15,00	11,67	77	15,00	25,00	117	40,00	40,00
38	20,00	11,67	78	16,67	25,00			
39	25,00	11,67	79	18,34	25,00			
40	30,00	11,67	80	20,00	25,00			

Apêndice F. Quadro com as coordenadas cartesianas dos pontos amostrais da malha experimental.