

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Correlação entre a produtividade e teor de proteína bruta do
capim-Marandu com atributos físicos e químicos de um
Latossolo do Cerrado Brasileiro

MARIA CECÍLIA CAVALLINI

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andreotti

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Correlação entre a produtividade e teor de proteína bruta do
capim-Marandu com atributos físicos e químicos de um
Latossolo do Cerrado Brasileiro

MARIA CECÍLIA CAVALLINI

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andreotti

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Mestre em
Agronomia.

Especialidade: Sistemas de Produção

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

C377c Cavallini, Maria Cecília.
Correlação entre a produtividade e teor de proteína bruta do capim-Marandu com atributos físicos e químicos de um latossolo do cerrado brasileiro / Maria Cecília Cavallini. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.
118 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2009

Orientador: Marcelo Andreotti
Bibliografia: p. 95-118

1. Solos - Fertilidade. 2. Solos – Manejo. 3. Solos - Densidade. 4. Matéria orgânica. 5. Resistência mecânica à penetração.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CORRELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE E TEOR DE PROTEÍNA BRUTA DO
CAPIM-MARANDU COM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO DO
CERRADO BRASILEIRO

AUTORA: MARIA CECÍLIA CAVALLINI
ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI

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

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira

Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira

Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO MONTEIRO
Departamento de Solos e Nutrição de Plantas / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" -
Usp

Data da realização: 12 de maio de 2009.

DEDICO

Aos meus pais, Luiz Américo Cavallini e Anésia Gomes Cavallini, que me incentivaram a conquistar mais esta etapa da minha vida estando sempre ao meu lado. E também, pelo imenso amor e carinho que sempre dedicaram a mim. Amo muito vocês!

Agradeço a Deus
por nunca me abandonar e
me dar forças para que eu promova
as minhas conquistas.

OFEREÇO

Aos meus irmãos

Luiz Américo Cavallini Filho e Leandro Alberto Cavallini, que sempre me apoiaram.

Às minhas cunhadas, Alexandra e Lilia, pela amizade dedicada.

Ao meu namorado Matheus, pelo carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me deu forças para superar as dificuldades.

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 acolhimento e pelas condições de aprendizado oferecido ao longo do curso.

Ao Prof. Dr. Marcelo Andreotti pelos seus ensinamentos, competência, dedicação, incentivo, amizade e exemplo de profissionalismo com que me orientou.

Aos professores, em especial Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho, e funcionários do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos do Campus de Ilha Solteira e ao técnico Valdivino, por toda sua ajuda, paciência, competência, bom humor e ensinamentos.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa, pela ajuda e apoio prestados.

À amiga Letícia, pela ajuda no experimento e companheirismo que foram de grandiosa importância para a condução deste trabalho.

Às minhas companheiras e amigas Adriana, Ana Paula, Danila, Elielda, Flávia, Francielle, Keka, Letícia, Lísia, Maysa e Ticiania, pelo amor, carinho, confiança, paciência, conselhos e por todos os momentos de alegrias e tristezas compartilhadas.

Aos amigos Adriana, Alini, Amanda, Ana Paula, André, Aral, Camila, Castellane, Caio, Carlos Eduardo, Cleiton, Christiam, Cristiano, Cyro, Daniela, Danila, Danilo, Elielda, Erica, Evandro, Fábio, Fernanda, Flávia, Francielle, Gilberto, Heder, Katiane, Juliana, Laudicéia, Letícia, Lísia, Luciana, Luciano, Mariana, Maysa, Norberto, Pedro, Rafael, Rafael Spechoto, Ricardo, Ticiania, William Sakomura e William Takao e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tiveram alguma participação nesta minha jornada.

CAVALLINI, M. C. **Correlação entre a produtividade e teor de proteína bruta do capim-Marandu com atributos físicos e químicos de um Latossolo do Cerrado Brasileiro**. Ilha Solteira, 2009. 118f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

RESUMO

Em sistema de integração lavoura-pecuária, os diversos cultivos em sistema plantio direto alteram os atributos do solo, refletindo na produtividade e na composição do vegetal. O objetivo foi selecionar entre os atributos do solo aqueles que melhor expliquem a variabilidade da produtividade e teor de proteína da *Brachiaria brizantha*. Foram analisadas as correlações lineares e espaciais entre as produtividades de massa fresca (MF) e massa seca (MS) e teor de proteína bruta (PB) da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico, em três profundidades (0,00-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,30 m). Para tanto, foi instalada a malha geoestatística para a coleta das informações, contendo 124 pontos amostrais, numa área de 4000 m². A produtividade de forragem e o teor de proteína bruta não variaram aleatoriamente, e apresentaram alcances da dependência espacial entre 41,1 e 63,1 m. A densidade da partícula na primeira camada (DP1), a densidade do solo em todas as camadas (DS1, DS2 e DS3), a macroporosidade nas primeiras camadas (MA1 e MA2), a microporosidade em todas as camadas (MI1, MI2 e MI3), a porosidade total determinada em todas as camadas (PTd1, PTd2 e PTd3), o teor de fósforo nas últimas camadas (#P2 e P3), a resistência mecânica à penetração na última camada (RP3), a umidade volumétrica nas primeiras camadas (UV1 e UV2), o pH na primeira camada (pH1), o teor de matéria orgânica em todas as camadas (MO1, MO2 e #MO3), também apresentaram dependência espacial com alcances variando entre 6,4 e 73,5 m. A análise das correlações lineares simples de atributos da planta *versus* do solo revelou que com o aumento da RP, na camada de 0,10-0,30 m, correspondeu à mais baixa produção de MS, entretanto, com o aumento do teor de P em profundidade ocorreu aumento da massa seca da *Brachiaria brizantha*. Constatou-se excelente correlação espacial dos atributos relacionados à produtividade de MF, MS e teor de PB da *Brachiaria brizantha*. Por outro lado, as correlações espaciais entre os atributos da planta e os do solo, no geral, foram de baixas a altas, com interações positivas entre causa e efeito (MS=f(DS3), MS=f(MA2) e MS=f(P3)),

assim como negativas ($MS=f(MI2)$, $MS=f(PTd3)$, $MS=f(RP3)$ e $PB=f(\#MO3)$). A PTd3 comportou-se como um bom indicador da qualidade física do solo pesquisado para a estimativa da MS da *Brachiaria brizantha*, enquanto que o MO3 foi o melhor indicador da qualidade química do solo para estimativa do teor de PB da forrageira.

Termos para indexação: densidade do solo, fertilidade do solo, manejo do solo, matéria orgânica, resistência mecânica à penetração

CAVALLINI, M. C. **Correlationship among dry matter yield and crude protein content of Marandu polisadegrass with physic and chemical attributes in a savannah Oxisol.** Ilha Solteira, 2009. 118f. Dissertation. (Master Science of Systems of Production) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

ABSTRACT

In crop-livestock integration the several crops in no tillage system interfere on the attributes of soil, altering the productivity and vegetable composition. Therefore, the objective this study was to select among the researched attributes of the soil those that best explain the variability of the productivity and crude protein content of the *Brachiaria brizantha*. The linear and space correlations were analyzed between the productivity of fresh mass (MF), dry mass (MS) and crude protein (PB) of the *Brachiaria brizantha* and of some attributes of a Dystroferric Red Latosol (Oxisol), in three depths (0.0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 m). A geostatic grid was installed for collecting data, containing 124 points in an area of 4,000 m². The attributes of the plant did not vary randomizing with reaches of the space dependence between 41.1 and 63,1 m. To soil attributes there was space dependence (DP1, DS1, DS2, DS3, MA1, MA2, MI1, MI2, MI3, PTd1, PTd2, PTd3, #P2, P3, RP3, UV1, UV2, pH1, MO1, MO2 and #MO3), with reaches varying between 6,4 and 73.5 m. For simple linear correlations analysis with the increase of RP3 there was reduction of the MS, and with increasing content of P in depth was increased dry mass of *Brachiaria brizantha*. Already for the space correlations, between the attributes of the plant and soil there were positive and negative interactions between cause and effect, and PTd3 behaved as an appreciable indicator of the physical quality of the soil for the estimate of MS of the *Brachiaria brizantha*.

Index terms: soil density, soil management, soil penetration resistance, organic matter, soil fertililidade

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página	
1	Equações de regressão entre a produtividade da massa seca (MS) do capim-Marandu com alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	62
2	Equações de regressão entre a produtividade da massa fresca (MF) do capim-Marandu com alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	63
3	Equações de regressão entre a produtividade da massa fresca (MF) do capim-Marandu com alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	64
4	Equações de regressão entre a produtividade da massa seca (MS) do capim-Marandu com alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	65
5	Equações de regressão entre o teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu com alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	66
6	Semivariogramas simples dos atributos massa fresca (MF), massa seca (MS) e teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....70
7	Semivariogramas simples da densidade de partículas (DP1, DP2 e DP3) e da densidade do solo (DS1, DS2 e DS3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	71
8	Semivariogramas simples da macroporosidade (MA1, MA2 e MA3) e microporosidade (MI1, MI2 e MI3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	72
9	Semivariogramas simples da porosidade total determinada e calculada (PTd1, PTd2, PTd3, PTc1, PTc2 e PTc3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	73
10	Semivariogramas simples dos teores de fósforo (P1, #P2 e P3) e resistência mecânica à penetração (RP1, RP2 e RP3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	74
11	Semivariogramas simples das umidades gravimétrica e volumétrica (#UG1, #UG2, #UG3, UV1, UV2 e #UV3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria	

	(MS).....	75
12	Semivariogramas simples do pH (pH1, pH2 e pH3) e do teor de matéria orgânica (MO1, MO2 e #MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	76
13	Mapas de krigagem da produtividade de massa fresca (MF), massa seca (MS) e teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	80
14	Mapas de krigagem da densidade de partículas (DP1) e da densidade do solo (DS1, DS2 e DS3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	81
15	Mapas de krigagem da macroporosidade (MA1 e MA2) e microporosidade (MI1, MI2 e MI3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	82
16	Mapas de krigagem da porosidade total determinada (PTd1, PTd2 e PTd3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	83
17	Mapas de krigagem do teor de fósforo (P2 e P3) e da resistência mecânica à penetração (RP3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	84
18	Mapas de krigagem da umidade volumétrica (UV1 e UV2) e do pH1 num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	85
19	Mapas de krigagem do teor de matéria orgânica (MO1, MO2 e #MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	86
20	Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função da densidade (DS3) e da macroporosidade (MA2) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	89
21	Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função da microporosidade (MI2) e da porosidade total determinada (PTd3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	90
22	Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função do teor de fósforo (P3) e da resistência à penetração (RP3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	91
23	Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem do teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu em função do resíduo do teor de matéria orgânica (#MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	92

LISTA DE QUADROS

Quadros		Página
1	Características químicas do solo antes da implantação do experimento.....	36
2	Caracterização da densidade do solo (DS), macro (MA), micro (MI) e porosidade total (PT) do solo antes da implantação do experimento.....	36
3	Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do capim-Marandu (52 dias após corte) e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	46
4	Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre atributos do capim-Marandu e alguns atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	58
5	Equações de regressão linear simples e coeficientes do ajuste entre atributos da planta e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	61
6	Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	69
7	Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	78
8	Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para alguns atributos do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	88
9	Parâmetros das validações cruzadas referentes às co-krigagens de alguns atributos do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	93

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice		Página
A	Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento no período compreendido entre janeiro de 2007 a outubro de 2007.....	119
B	Esquema de campo da malha experimental de coletas de dados, seqüencialmente do ponto amostral 1 até o 124.....	120

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Aspectos gerais da <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu.....	15
2.2 Integração agricultura – pecuária.....	16
2.3 Sistema de semeadura direta na palha.....	18
2.4 Alguns atributos físicos do solo.....	21
2.5 Alguns atributos químicos do solo.....	24
2.6 A geoestatística na pesquisa agronômica.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Caracterização do local de origem dos resultados.....	35
3.2 Caracterização inicial do solo pesquisado.....	35
3.3 Implantação e condução da planta-teste pesquisada.....	36
3.4 Implantação e caracterização da malha experimental utilizada para coleta dos atributos pesquisados.....	37
3.5 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados.....	37
3.6 Análise estatística dos atributos estudados.....	39
3.6.1 Análise descritiva inicial dos resultados.....	39
3.6.2 Análise de regressão.....	40
3.6.3 Análise geoestatística.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Análise descritiva dos resultados.....	43
4.1.1 Variabilidade dos atributos estudados.....	43
4.1.1.1 Atributos da planta.....	43
4.1.1.2 Atributos do solo.....	44
4.1.2 Distribuição de frequência e valores médios dos atributos estudados.....	49
4.1.2.1 Distribuição de frequência dos atributos.....	49
4.1.2.2 Valores médios dos atributos.....	50
4.1.2.2.1 Atributos da planta.....	50
4.1.2.2.2 Atributos do solo.....	51
4.2 Análise de regressão entre os atributos estudados.....	54
4.2.1 Regressão linear simples.....	54

4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos estudados.....	54
4.2.1.1.1 Atributos da planta <i>versus</i> atributos da planta.....	55
4.2.1.1.2 Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	55
4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos estudados.....	57
4.3 Análise geoestatística dos atributos estudados.....	67
4.3.1 Análise dos semivariogramas simples.....	67
4.3.1.1 Validação cruzada dos semivariogramas simples.....	77
4.3.1.2 Mapas de krigagem.....	79
4.3.2 Análise semivariográfica cruzada.....	86
4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem (planta <i>versus</i> solo).....	86
5 CONCLUSÕES.....	94
6 REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a degradação dos solos e a baixa produtividade das pastagens têm merecido especial atenção por parte da classe agrônômica e dos produtores rurais. No Cerrado, em condições limitantes de fertilidade ou por compactação, pastagens com manejo inadequado conduzem à degradação do solo. Assim, entende-se por degradação de pastagem o processo evolutivo da perda do vigor, produtividade e capacidade de sua recuperação natural, tornando-a incapaz de sustentar a produção e o valor nutritivo exigidos pelos animais, bem como de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e plantas daninhas. Para frear esse processo e recuperar as pastagens já degradadas, um caminho eficaz tem sido o da exploração da pecuária integrada com a agricultura, pela utilização do sistema de semeadura direta na palha (SPD), tecnologia fundamentada na ausência do revolvimento do solo, presença de cobertura morta e rotação de culturas. Por isso, para a consolidação e sucesso desse sistema, é de fundamental importância o estabelecimento de culturas para a produção de palhada em quantidade adequada à cobertura do solo.

A integração agricultura-pecuária é uma das alternativas para viabilizar a agropecuária brasileira, aumentando a receita do agricultor e/ou do pecuarista, além de fornecer nutrientes para as plantas, melhorar a fertilidade do solo, permitir a rotação de culturas, diminuir a incidência de pragas e doenças e gerar empregos. Para tanto, existem vários caminhos e, entre eles, as culturas anuais adubadas, como o feijão (*Phaseolus vulgaris*) e/ou espécies forrageiras produtoras de silagem.

Os processos e atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao ambiente, variam no espaço e no tempo. Portanto, estes atributos físicos e químicos do solo podem ser espacialmente correlacionados, conduzindo para que a dependência espacial explique a influência dos fatores e processos de sua formação, assim como do seu manejo. Desta forma, isto pode contribuir para o aumento

da produtividade agrícola. Por outro lado, o mapeamento dos atributos do solo numa área agrícola é importante, tanto para a recomendação de práticas de manejo do solo, quanto para a avaliação da agricultura na qualidade ambiental. Assim, o efeito das alterações nos atributos físicos do solo e sua correlação com a variabilidade espacial da produtividade das culturas, provocada por manejos do solo, ainda não estão bem definidos.

A adoção da integração da agricultura com a pecuária, pelo uso do SPD, altera a estrutura do solo, que por sua vez interfere nas características físicas da sua camada superficial, vindo a interferir na produtividade das culturas. Este sistema na produtividade das culturas e na pastagem são muito dependentes das condições locais ou sazonais, apresentando resultados controvertidos. Por outro lado, um sistema de manejo do solo em agricultura de precisão é aquele no qual as limitações da produtividade das culturas e a proteção ambiental podem ser identificadas, caracterizadas e manejadas em tempo e local adequados. Assim, a caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos dos solos, associada a outras técnicas estatísticas de tomada de decisões, pode contribuir para a agricultura econômica e ecologicamente sustentável.

Objetivou-se avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre alguns atributos físicos e químicos do solo, a produção de forragem e o teor de proteína bruta do capim-braquiarião (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu), assim como estudar as correlações lineares e espaciais entre tais atributos, visando identificar quais destes interferiram no aumento da produtividade, em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico do Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu

A espécie é originária de uma região vulcânica da África, onde os solos geralmente apresentam bons níveis de fertilidade. Por isso essa espécie é recomendada como alternativa para região do cerrado com média a boa fertilidade. Também apresenta boa tolerância a altos níveis de alumínio e manganês no solo, não respondendo significativamente à calagem. A produtividade média é de 4 a 8 t ha⁻¹ de massa seca, podendo chegar a 20 t ha⁻¹ (ALCÂNTARA; BUFARAH, 1992).

A escolha acertada da espécie forrageira para a formação da pastagem é o primeiro passo de fundamental importância para o sucesso de sua exploração, caracterizado por sua capacidade de suporte, desempenho animal e, em consequência, sua produtividade, a produção animal por hectare, além da perenidade da pastagem (GOMIDE; GOMIDE, 2007).

As gramíneas tropicais, de maior potencial de produtividade nos trópicos que as gramíneas de clima temperado, caracterizam-se por estar adaptadas às faixas mais altas de temperatura ótima, fotoperíodo mais longo e maior eficiência fotossintética. A *Brachiaria brizantha* não é recomendável para a formação de pastagem em solos argilosos, com alta capacidade de retenção de água e propenso a alagamento em terrenos de baixadas (GOMIDE; GOMIDE, 2007).

Áreas para produção de capim podem ser eventualmente pastejadas durante todas as estações do ano, o que sugere a possibilidade de formação de camadas compactadas no solo. Entretanto, a compactação do solo sob pastagem e pisoteio animal é temporária e superficial, até cerca de 0,08 m de profundidade. A descompactação, neste caso, é facilmente realizada com o disco de corte e o sulcador tipo facão da própria semeadora, cujo mecanismo

possibilita a descompactação e a aplicação do fertilizante, até 0,15 m de profundidade (BROCH, 2000).

As gramíneas, pelo seu sistema radicular fasciculado, têm maior facilidade que as plantas de sistema radicular pivotante de penetrar suas raízes em camadas compactadas (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2003). Silva et al. (1992), em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, verificaram que a produção de massa seca da parte aérea da *Brachiaria brizantha* foi menos afetada pela compactação do solo em comparação aos capins Tobiatã (*Panicum maximum* cv. Tobiatã), Andropogom (*Andropogon gayanus*), Colonião (*Panicum maximum* Jacq cv. Colonião) e Gordura (*Melinis minutiflora*)

Os resíduos das gramíneas promovem a melhoria física do solo por possuírem maior conteúdo de lignina, possibilitando aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos (Primavesi, 1982), favorecendo a estruturação e a estabilidade dos agregados do solo (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1994) e tornando-o menos suscetível à compactação.

2.2 Integração agricultura - pecuária

A degradação dos solos e a baixa produtividade das pastagens e lavouras têm merecido especial atenção por parte da classe agrônômica e dos produtores rurais brasileiros. Estas prerrogativas alteraram o conceito em se explorar uma única cultura por ano agrícola no sistema convencional de manejo do solo, que por sua vez, alastrou efeitos bióticos nocivos às culturas, reduziu o teor de matéria orgânica do solo, potencializou as diversas formas de erosão, dentre outros, e os aumentos de produtividade ficaram condicionados, cada vez mais, aos insumos energeticamente dispendiosos, como o uso de adubos (ANDREOTTI et al., 2008).

Dessa forma, foi introduzido no Cerrado o SPD que exige boa rotação de culturas, principalmente com espécies altamente produtoras de folhas que podem ser usadas como palhas, tal como as gramíneas forrageiras, além do não revolvimento do solo, o uso de plantas de cobertura para formar e manter a palhada sobre o terreno e, mais recentemente, a integração lavoura-pecuária. O Brasil já deu mostras de grande adoção deste sistema no cerrado, visto que o processo de produção de cultivos anuais, via de regra, repõe nutrientes ao solo, mas degrada, excetuando-se no SPD, em que as propriedades físicas (estruturação e

compactação) e biológicas (decomposição da matéria orgânica) do solo são menos alteradas (SILVA; REINERT; REICHERT, 2004).

As espécies forrageiras tropicais utilizam os nutrientes residuais deixados pelas lavouras na superfície do solo, reciclam os nutrientes do subsolo, repõem a matéria orgânica e promovem a aração biológica do solo graças à abundância e agressividade de seus sistemas radiculares e da atividade biológica decorrente desse desenvolvimento radicular e posterior decomposição (AIDAR; KLUTHCOUSKI, 2003).

As premissas para a sustentabilidade agropecuária, tendo como enfoque o Brasil, são necessariamente a recuperação das áreas degradadas por lavoura ou pecuária, a preservação ambiental e o aumento da produtividade. Já nos Cerrados, estas premissas, tendo como enfoque o produtor rural, são fundamentalmente a redução nos custos de produção, a agregação de valores e o uso intensivo da área, principalmente sob lavoura, durante todo ano, devendo ser mantidas altas produtividades. Em áreas com pastagens e solos degradados, são possíveis os consórcios, as rotações e as sucessões lavouras-forrageiras, com o principal objetivo de recuperá-las. Nesse caso, a produção de grãos visa, fundamentalmente, ao ressarcimento parcial ou total dos dispêndios realizados com insumos e serviços utilizados (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2003).

As pastagens representam uma forma racional de conservação dos atributos físicos do solo, desde que bem manejadas, com reposição de nutrientes e lotação adequada (FREGONESI et al., 2001). A utilização de gramíneas perenes, como as *Brachiaria spp.*, em consórcio ou rotação com culturas anuais, pode minimizar a degradação, pelo efeito benéfico aos atributos físico-hídricos do solo, em função do sistema radicular fasciculado, que tem maior facilidade de penetrar em camadas compactadas (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2003).

No entanto, se o uso de pastagem não for efetuado de forma adequada, ocorrerão conseqüências negativas ao ambiente, uma vez que a degradação da pastagem diminui a cobertura do solo e o deixa exposto à chuva e ao pisoteio do gado. Com isso, resulta no aumento da densidade do solo da camada superficial e da porosidade total. Devido à diminuição da produção da parte aérea na pastagem degradada, há uma diminuição das raízes no perfil do solo e concentração do sistema radicular próximo à superfície (MULLER et al., 2001).

O grau de compactação provocado pelo pisoteio bovino é influenciado pela textura do solo (CORREA; REICHARDT, 1995), sistema de pastejo (LEÃO et al., 2004), altura de manejo da pastagem (CASSOL, 2003), quantidade de resíduo vegetal sobre o solo (BRAIDA

et al., 2004) e umidade do solo (BETTERIDGE et al., 1999). No entanto, o efeito do pisoteio animal sobre as propriedades físicas do solo é limitado as suas camadas mais superficiais (TREIN; COGO; LEVIEN, 1991, BASSANI, 1996), podendo ser temporário e reversível (MORAES; LUSTOSA, 1997, CASSOL, 2003).

Cassol (2003) encontrou aumento na infiltração de água diretamente proporcional ao incremento da altura de resíduo na pastagem, evidenciando a degradação da qualidade do solo, quando utilizou elevada pressão de pastejo, em áreas de integração agricultura-pecuária, sob SPD.

2.3 Sistema de semeadura direta na palha

Manejos conservacionistas do solo, quando comparados ao preparo convencional, proporcionam características físicas e químicas distintas no perfil do solo. As operações de mobilização empreendidas por tais manejos podem piorar as propriedades físicas, tais como a densidade do solo, a porosidade e a resistência mecânica à penetração. Isto pode afetar a distribuição e morfologia das raízes, de forma muito peculiar, com reflexos negativos ao crescimento da parte aérea do vegetal (KLEPKER; ANGHINONI, 1995).

A adoção do SPD, para a produção anual de grãos, tem despertado atenção para a degradação estrutural de solo, constatada por resultados de pesquisa que demonstram elevação da densidade do solo e aumento de resistência mecânica à penetração, e conseqüentemente pela inibição do desenvolvimento de raízes, o que causa menor desenvolvimento de plantas (TORRES; SARAIVA, 1999). Muitos usuários do plantio direto alegam que a compactação de solo tem sido a principal causa de redução de produtividade de grãos. Porém, Kochhann, Denardin e Faganello (1999) sustentaram que a suposição de que a continuidade do SPD por vários anos implicaria em problemas de degradação estrutural, na camada superficial do solo, nem sempre é comprovada.

Os trabalhos desenvolvidos por Silva (1993), Da Ros et al. (1997), Albuquerque, Sangoi e Ender (2001) em sistemas de rotação de culturas sob semeadura direta, incluindo espécies com sistema radicular agressivo e com diferente produção de fitomassa, sugerem que as propriedades físicas e químicas de solo podem ser alteradas. A introdução de novas espécies de plantas de cobertura no sistema de produção do Cerrado pode contribuir para otimização do SPD, por meio da manutenção da cobertura do solo com resíduos vegetais. Isso

pode propiciar melhoria das características físicas e químicas do solo e manutenção e/ou, elevação do teor de matéria orgânica desses solos; diminuição da erosão hídrica e eólica, em decorrência da proteção proporcionada pela cobertura morta; manutenção da temperatura do solo; além de agir como uma barreira física contra a infestação de plantas daninhas, favorecendo a germinação e o desenvolvimento das culturas subseqüentes (BOER et al., 2008).

A decomposição da palhada nos Cerrados é rápida, e a taxa de decomposição pode ser até 10 vezes mais acelerada em regiões de clima tropical e subtropical do que em regiões de clima temperado (LAL; LOGAN, 1995). A alternativa é a utilização de plantas de cobertura que tenham elevada produção de resíduos e que apresentem menor velocidade de decomposição, mantendo os resíduos vegetais sobre o solo por maior tempo (CERETTA et al., 2002), principalmente em regiões com elevadas temperaturas e elevada quantidade de chuvas na primavera-verão, como o Centro-Oeste (BOER et al., 2008).

Na região de Cerrados a decomposição dos resíduos vegetais é rápido, em razão de altas temperaturas e elevado índice pluviométrico, de forma que a manutenção nesta região de uma elevada cobertura do solo por um longo tempo torna-se uma atividade complexa, necessitando de conhecimento e experiência prática de quem adota o SPD (ALVARENGA et al., 2001).

A cobertura morta na superfície do solo é o principal componente de sucesso do SPD nos Cerrados. No entanto, em vista das altas temperaturas e umidade na região, a decomposição dessa cobertura geralmente é rápida. Os restos culturais produzidos pelas diversas lavouras anuais dificilmente atingem quantidade e longevidade suficientes para assegurar a proteção plena do solo e, por conseguinte, garantir a máxima eficiência do SPD. Estudos revelam que para cobertura morta ideal são necessárias cerca de 7 t ha⁻¹ de resíduos. Considera-se ainda que, no que se refere à longevidade da palhada, as fontes originadas de gramíneas são melhores que as das leguminosas. Dentre as gramíneas, as *Brachiaria spp.* destacam-se, seja no que tange à quantidade de palhada produzida, seja devido a sua lenta degradação, o que proporciona proteção apropriada ao solo para, por exemplo, o cultivo do feijão na entressafra no Planalto Central Brasileiro (KLUTHCOUSKI, 2004).

As espécies do gênero *Brachiaria* são cespitosas (*Brachiaria. brizantha*, *Brachiaria. decumbens* e *Brachiaria ruzizienses*) ou estoloníferas (*Brachiaria humidicola* e *Brachiaria dictyoneura*). Aquelas de comportamento cespitoso tendem a formar touceiras geralmente altas, sendo preteridas pelos animais quando o pastejo é mal conduzido. Para a formação de palhada para o SPD, esse fenômeno deve ser evitado, mantendo-se a planta forrageira com

altura em torno de 40-50 cm. Os melhores procedimentos são o manejo contínuo com pastejo ou roçagem, até cerca de 30 dias antes da dessecação, e o estabelecimento da cultura anual. É preferível que, no momento da dessecação, a planta de *Brachiaria spp.* tenha o máximo possível de folhas novas para melhor ação dos desseccantes (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2003).

As *Brachiaria spp.* têm um sistema radicular fasciculado bem desenvolvido, assim como o pé-de-galinha gigante (*Eleusine coracana*), o milheto (*Pennisetum americanum*) e o sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*), o que permite uma boa ciclagem de nutrientes. Outras vantagens agrônômicas também estão associadas, como a supressão de plantas daninhas, de pragas e doenças, solubilização de fósforo, auxílio à ação das micorrizas e todos os ganhos oriundos da manutenção da umidade residual. Também com a atividade biológica, além do que, o estabelecimento do sistema radicular origina canalículos que vão auxiliar a infiltração da água das chuvas, além do aumento da matéria orgânica e o seqüestro do carbono. Contudo, a maior de todas as vantagens é mesmo a proteção do solo (TRECENZI, 2005).

Avaliando o efeito da manutenção da palhada sobre o solo, Amado; Cogo e Levien (1989) observaram que cobertura de 20% do solo com resíduos vegetais reduz a sua perda em aproximadamente 50%, em relação ao solo descoberto para resíduos uniformemente distribuídos. Torres et al. (2005), em experimento com milheto, semeado em pré-safra em solo de Cerrado e manejado aos 110 dias da semeadura, constataram meia-vida para decomposição dos resíduos de 112 dias, demonstrando ser a palhada do milheto mais persistente no solo do que a *Brachiaria spp.*, que apresentou meia-vida de 77 dias. Essa maior persistência do milheto foi devida à decomposição mais lenta do material, que possui elevados teores de lignina e de celulose, tornando-o mais resistente a decomposição.

Salton (2001) recomendou que, ao se realizarem semeaduras sobre palhada de *Brachiaria spp.*, estas, antes da dessecação, devem estar em boas condições de produção forrageira e, conseqüentemente, dispor de bom sistema radicular, a chamada "cabeleira de raízes". Estes cuidados podem promover importantes melhorias das propriedades do solo, tanto pela proteção da superfície quanto pela decomposição dos resíduos orgânicos das raízes e da palhada de cobertura.

Como elemento de cobertura, as *Brachiaria spp.*, como muitas outras gramíneas forrageiras, caracterizam-se por apresentarem ativo e contínuo crescimento radicular, reciclagem de nutrientes e preservação do solo com relação à matéria orgânica, nutrientes, agregação, estrutura, permeabilidade e infiltração, entre outros. A camada de palha, ao cobrir a superfície do solo, impede a formação de crostas, permitindo maior taxa de infiltração de

água e maior movimentação de água no perfil, em função dos canais abertos pelas raízes decompostas, na denominada aração biológica (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2003).

2.4 Alguns atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade das culturas podem ser divididos em duas categorias. A primeira relaciona aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento das plantas, a saber, a água, o oxigênio, a resistência mecânica à penetração e a temperatura, os quais afetam processos fisiológicos das plantas tais como a fotossíntese, crescimento radicular e foliar. A segunda relaciona os indiretamente envolvidos com as plantas, tais como a textura, a agregação, a porosidade e a densidade do solo, que afetam a produtividade das culturas devido à influência na retenção de água, aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração (SILVA; NOGUEIRA JUNIOR, 2001).

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, inclusive da resistência mecânica à penetração, é dependente de fatores de formação do solo e fatores relacionados com o seu manejo (SOUZA et al., 2001). No SPD, a ausência de revolvimento provoca aumento da densidade do solo (HAKANSSON; MEDVEDEV, 1995, KERTZMANN, 1996, KLEIN, 1998, SILVA; CURI; BLANCANEAUX, 2000, SILVA; REINERT; REICHERT, 2000) que se reflete em maior resistência mecânica à penetração. No campo, a resistência mecânica à penetração é bem variável, sendo influenciada pelas condições do manejo do solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente da umidade do solo. O acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre o solo provoca locais de maior estado de compactação, principalmente, nas quais o tráfego é mais intenso (SILVA; REINERT; REICHERT, 2004).

Os fatores que afetam diretamente o desenvolvimento das plantas variam temporal e espacialmente no campo e não são independentes entre si. A resistência mecânica à penetração pode ser alterada de maneira diferenciada pelos sistemas de preparo do solo (GONÇALVES et al., 1998).

De acordo com Goedert; Schermack e Freitas (2002), a diminuição dos macroporos constitui um tema de crescente importância em face do aumento da mecanização nas atividades agrícolas, que acarreta alteração no arranjo das partículas do solo, tornando-o mais

denso. Os principais efeitos negativos são o aumento da resistência mecânica à penetração, a redução da aeração (macroporos) e das disponibilidades de água (microporos) e de nutrientes, e, conseqüentemente, mais baixa produtividade agrícola. Trabalhos têm mostrado que o crescimento das raízes é prejudicado quando a macroporosidade do solo é reduzida a valor inferior a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979). Neste caso, somente a partir da densidade do solo equivalente a $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ ocorreria problema para as raízes. Além disso, ao diminuir a macroporosidade, segundo Kertzmann (1996), parte significativa da água fica retida nos microporos sob altas tensões e, portanto, indisponível às plantas.

Segundo Tavares-Filho et al. (2001), uma pesquisa qualitativa (distribuição espacial das estruturas no perfil do solo) e quantitativa (grau de compactação do solo) ganha importância para auxiliar na verificação da qualidade do manejo utilizado e também no estabelecimento de limites de compactação que não afetem o crescimento radicular das plantas nos sistemas de manejo. Dessa forma, o monitoramento periódico do estado de compactação do solo por meio da resistência mecânica a penetração é uma forma prática de avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo na estrutura do solo e no crescimento radicular das culturas. Somente com acompanhamento ou avaliação periódica dessa resistência mecânica à penetração é que o agricultor poderá conhecer, de forma mais detalhada, os efeitos provocados pelos sistemas de manejo e coletar subsídios importantes para sua conservação (CAMARGO; ALLEONI, 1997) e melhoria de produtividade.

Pesquisas que informam o número representativo de amostras para estudos com penetrômetros de impacto são escassas e as repetições feitas em campo são variáveis, segundo a relação custo-benefício, o que pode conduzir a repetições de campo não suficientes para avaliação dessa propriedade e a resultados não representativos da área considerada. Isto pode, por exemplo, conduzir as decisões quanto ao preparo do solo com base em uma interpretação errônea do seu estado de compactação devido à variabilidade dessa propriedade física (TAVARES FILHO; RIBON, 2008). Para Torres e Saraiva (1999), as leituras com penetrômetros são importantes para a definição das áreas com maiores problemas de compactação, sendo, para isso, necessária uma amostragem intensa.

Normalmente, as determinações de densidade e de porosidade do solo são as avaliações mais comuns e difundidas para identificar camadas compactadas no solo, porém a resistência mecânica do solo a penetração, expressa pelo índice de cone, também está diretamente relacionada com o estado de compactação do solo e pode ser uma medida mais sensível para identificar a compactação, especialmente em camadas pouco espessas (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004).

A umidade possui pouco efeito na resistência mecânica à penetração empolado e solto, aumentando, contudo, com o aumento de sua densidade. Por outro lado, a influência da densidade na resistência é tão maior quanto mais seco estiver o solo. A taxa de alongamento radicular diminui com o aumento da resistência ao penetrômetro, que contrariamente às raízes, segue trajeto linear no solo, de forma insensível à presença dos bioporos, planos de clivagem e/ou fraqueza, locais esses de extrema avidez ao alongamento radicular (BENGOUGH; CAMPBELL; O'SULLIVAN, 2001).

Sabe-se que um solo com valores de resistência mecânica à penetração variando entre 1,0 e 3,5 MPa (CANARACHE, 1990, MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999), ou de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Arshad, Lowery e Grossman (1996), poderá restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Os níveis críticos de resistência para o crescimento radicular das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Entretanto, quando obtida no momento em que a umidade do solo estiver equivalendo a 2/3 da microporosidade total (solo friável/macio), a maioria dos trabalhos adota a seguinte classificação da resistência mecânica à penetração (RP), estabelecida por Arshad, Lowery e Grossman (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: $2,0 \leq RP < 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 \leq RP < 8,0$ MPa e g) extremamente alta: $RP \geq 8,0$ MPa.

Silva, Kay e Perfect (1994) relacionaram o valor de 2,0 MPa para resistência mecânica a penetração como limite para o desenvolvimento radicular. Neste aspecto, Pérez-Gomar, Reichert e Reinert (2002) observaram que quando a umidade do solo encontra-se ao redor de $0,240 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a resistência mecânica à penetração resultou valores superiores ao referido 2,0 MPa, encontrando-se também uma zona mais compactada entre a camada de 0,15 a 0,30 m. À medida que a umidade do solo aumentou para valores próximos de $0,290 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a resistência mecânica à penetração diminuiu, porém a camada resistente persistiu. Também, na condição de solo saturado, foram registrados os menores valores de resistência mecânica à penetração, mesmo na zona mais compactada.

Do ponto de vista físico-químico, o solo é um sistema trifásico disperso. Desta forma, exclusivamente com base no volume, o solo considerado ideal, do ponto de vista agrônômico, é aquele que apresenta $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de microporosidade, e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade, responsável pela aeração do solo) e $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volumes sólidos ($0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de matéria mineral e $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de matéria orgânica), conforme Kiehl (1979).

O uso e o manejo do solo alteram a sua densidade e, conseqüentemente, as porosidades totais e de aeração. A porosidade de aeração é a razão entre volume de ar, avaliado quando a umidade está na capacidade de campo, e o volume total. O ar ocupa o espaço poroso do solo não ocupado pela água. Para o solo seco, todo o espaço vazio (porosidade total) é ocupado pelo ar. A exigência das plantas para com a aeração do solo, isto é, a porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento, varia entre as espécies e os tipos de solos. Camargo e Alleoni (1997) também mostraram que as trocas gasosas do solo com a atmosfera são importantes para o bom desenvolvimento radicular e da parte aérea da planta. Essa difusão depende diretamente da porosidade livre de água. A porosidade de aeração é muito importante para a ramificação uniforme das raízes, pois, se ocorre baixa aeração, há proliferação das raízes superficiais. O aumento da concentração de raízes na superfície conduz a planta a retirar água apenas superficialmente, podendo causar deficiência hídrica em períodos de seca.

A porosidade do solo é dividida em macroporosidade e microporosidade. A primeira, sendo responsável pela aeração e drenagem da água, é constituída de poros com diâmetro maior do que 0,05 mm. Já a segunda, responsável pelo armazenamento da água, possui poros menores do que o referido valor. Essa divisão é de grande interesse agrônômico, uma vez que a microporosidade e a macroporosidade exercem diferentes e essenciais funções ao desenvolvendo das plantas. Na prática, sabe-se que condições ideais de porosidade total, macroporosidade e microporosidade raramente são alcançadas, devidas principalmente às influências antrópicas, estabelecidas pelo manejo inadequado da mecanização agrícola. Assim, valores de macroporosidade menores do que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem afetar o desenvolvimento das raízes, a ponto de comprometer a produtividade vegetal (KIEHL, 1979).

2.5 Alguns atributos químicos do solo

A preocupação com o ambiente vem crescendo cada vez mais, e com ela a necessidade de estudos detalhados, visando a implantação do planejamento conservacionista, com o objetivo de manejar de forma adequada os recursos naturais, agredindo-o o mínimo possível. O conhecimento dos atributos físicos dos solos, envolvendo principalmente aqueles relacionados com a sua distribuição granulométrica e que influenciam diretamente o fluxo

superficial e o movimento de água no solo, é fundamental para o planejamento ambiental. É essencial também o estudo de sua fertilidade, uma vez que a baixa disponibilidade de nutrientes é um fator limitante à produtividade adequada das culturas. Por sua vez, a maior produtividade agrícola proporciona aumento da massa vegetal, que futuramente será convertida em resteva vegetal (palha), constituindo-se num dos fatores controladores da erosão e na ciclagem de nutrientes (GUERRA, 1998).

Os solos do Cerrado, em sua maioria, apresentam atributos químicos que limitam o crescimento das raízes das plantas e exigem práticas de manejo adequadas. Trata-se de solos de baixa capacidade de troca de cátions (CTC), com acidez elevada e com baixo teor de nutrientes, especialmente de fósforo. São solos com alto grau de intemperização e lixiviação e ocorrendo problemas de acidez em todo perfil (LOPES, 1983, ADAMOLI et al. 1987, GOEDERT, 1989, SOUSA; LOBATO, 2004).

A importância da matéria orgânica do solo para os diversos processos físicos, químicos e biológicos é amplamente reconhecida na literatura. A matéria orgânica do solo desempenha diversas funções no ambiente, estando ligada a ciclagem e retenção de nutrientes, agregação do solo e dinâmica da água, além de ser a fonte básica de energia para a atividade biológica. Sua perda pode interferir drasticamente nesses processos, dificultando o desempenho das funções do solo, provocando desequilíbrios no sistema e, conseqüentemente, desencadeando o processo de degradação (ROSCOE; BODDEY; SALTON, 2006). Segundo Bayer e Mielniczuk (1999), as perdas da matéria orgânica do solo são favorecidas, principalmente, pelo revolvimento do solo e conseqüente destruição dos agregados, maior fragmentação e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo, que resultam em alterações na temperatura, umidade e aeração do solo.

A acidez do solo normalmente reduz a produtividade de plantas forrageiras. O mapeamento da acidez do solo, seja pelo pH ou teor de H+Al numa área agrícola qualquer, é importante para tomada de decisão de práticas corretivas de acidez visando o aumento da referida produtividade (ARAÚJO et al., 2007).

O P nos solos tropicais se encontra em níveis abaixo do mínimo necessário ao desenvolvimento das plantas forrageiras (CECATO et al, 2004). Este nutriente desempenha papel importante no desenvolvimento do sistema radicular e no perfilhamento das gramíneas (HOFFMANN et al., 1995). A sua deficiência reduz a taxa de crescimento inicial e o estabelecimento das plantas forrageiras, além de limitar a capacidade produtiva das mesmas e, conseqüentemente, das pastagens (CECATO et al.,2004). O estresse de P provoca

crescimento rápido e substancial das raízes, o que é uma adaptação da planta para maximizar a absorção de P em solos deficientes deste elemento (CARVALHO et al., 1993).

O fósforo também favorece significativamente o crescimento e o perfilhamento das gramíneas, e sua disponibilidade é condicionada pela textura do solo (FONSECA et al., 1988, 1997 a, b, GUSS; GOMIDE; NOVAIS, 1990). Este nutriente é o mais limitante para o início do desenvolvimento e crescimento das forrageiras e, conseqüentemente para a produção de massa. Portanto, é necessária a aplicação de elevadas quantidades deste elemento ao solo, para suprir a deficiência e compensar a quantidade que permanece adsorvida aos colóides, ficando de forma indisponível as plantas (MELO, 2005). A falta de fósforo no solo reduz o desenvolvimento das espécies forrageiras e a concentração desse nutriente na massa seca da parte aérea delas, provocando severos prejuízos nutricionais aos animais que as consomem (WERNER, 1986).

Silva (1996), estudando os efeitos do suprimento de fósforo na produção da *Brachiaria decumbens* e da *Brachiaria brizantha*, por dois períodos subseqüentes (34 e 28 dias), observou que o incremento nas doses de fósforo resultou em aumento no número de perfilhos, o qual não teve diferença entre as duas espécies. Verificou também incrementos na produção de massa seca da parte aérea e das raízes, bem como na concentração de fósforo nas folhas dos capins devido ao aumento do suprimento de fósforo na solução.

2.6 A geoestatística na pesquisa agronômica

A agricultura moderna tem como fundamento o desenvolvimento sustentável do ponto de vista econômico e, ainda, da não-degradação do meio ambiente. Porém a intensificação da exploração agrícola, aliada ao uso e manejo inadequados do solo, tem provocado o aumento da erosão, a chamada erosão acelerada (WEILL, 1999). Tal erosão provoca o assoreamento e a poluição das áreas baixas, rios e reservatórios, podendo, até mesmo chegar à degradação de grandes extensões de terras. A degradação do solo nos trópicos, embora reconhecida como um problema grave e generalizado, ainda carece de estudos que avaliem aspectos físicos, químicos e ambientais, de forma integrada (SCHAEFER et al., 2002). O emprego da geoestatística, com o objetivo de avaliar a estrutura espacial das variáveis, introduz nova e importante ferramenta para a análise da variabilidade espacial de atributos do solo e dos fatores de erosão.

Cientistas da área de solos se preocupam com o problema de variação espacial e temporal dos solos desde o começo do século XX. Somente nas décadas de 1950 e 1960, com o avanço da teoria da estatística espacial, é que começaram a perceber a potencialidade deste instrumento para o manuseio de resultados quantitativos, facilitando a compreensão da variabilidade do solo (BURROUGH; BOUMA; YATES, 1994).

A geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SILVA; REINERT; REICHERT, 2004).

Avanços tecnológicos da agropecuária têm mostrado a importância de se medir a variação espacial e temporal de atributos que afetam a produtividade das culturas, com o objetivo de aperfeiçoar 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 resultados e de sua distribuição espacial (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002).

A análise geoestatística pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade espacial na produção das culturas, mas também para estimar respostas das plantas às determinadas práticas de manejo. A ação do sistema de manejo do solo e o sistema de tráfego não são uniformes em toda a área, o que torna importante analisar a distribuição espacial dos valores de resistência mecânica à penetração (SILVA; REINERT; REICHERT, 2004).

A grande maioria dos experimentos de manejo e fertilidade do solo utiliza o método de delineamentos experimentais, segundo o qual observações devem ser independentes umas das outras, e as parcelas experimentais uniformes quanto aos parâmetros estudados. Em face do conhecimento ainda incipiente sobre tal assunto, no início do século XX, a aceitação destas hipóteses foi grande, sem a necessária verificação. Diante dos conhecimentos estatísticos e recursos computacionais disponíveis, o rigor e a precisão científica exigem que se conheça profundamente o meio em estudo. A hipótese de independência entre as amostras só pode ser verificada na prática, se a amostragem contiver informações geográficas, como, por exemplo, as coordenadas com referência a um eixo arbitrário para possibilitar análises da geoestatística. Existem ferramentas geoestatísticas que podem ser úteis na análise da variabilidade espacial dos resultados, para os quais não existe independência entre amostras (VIEIRA; NIELSEN; BIGGAR, 1981, VIEIRA et al., 1983).

A aplicação de tecnologia, associada à variabilidade espacial e temporal, faz-se necessária, sobretudo na pesquisa agrícola que estuda o solo e a sua capacidade produtiva. O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado, recentemente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala. Experimentos de campo são, em sua maioria, divididos em parcelas ou áreas relativamente pequenas amostradas aleatoriamente. Contudo, ao considerar as parcelas experimentais uniformes quanto aos seus atributos, mesmo em pequenas áreas, podem-se interpretar erroneamente as respostas às questões existentes, pois a hipótese de ocorrência de dependência espacial estará sendo ignorada (GREGO; VIEIRA, 2005).

Conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado, podem-se analisar os resultados, possibilitando, segundo Vendrusculo (2001), representar a área com maior detalhamento. O nível de detalhamento é obtido por meio da distância entre pontos de amostragem, dependendo tanto do atributo a ser analisado quanto da escala de trabalho (tamanho da área amostrada). Os atributos químicos de uma parcela de 900 m² foram analisados por Vieira (1997), que detectou variabilidade suficiente para concluir que amostragem ao acaso provavelmente esconderiam a realidade.

Segundo Orlando Filho e Rodella (1983), cerca de 80 a 85% do erro total, dos resultados usados na recomendação de fertilizantes e corretivos, podem ser atribuídos à amostragem no campo e de 15 a 20% podem ser decorrentes do trabalho de laboratório. Daí a necessidade de um bom plano para uma amostragem representativa da fertilidade de uma área sendo necessário o conhecimento da variabilidade desses atributos químicos. A amostragem do solo é um dos procedimentos mais importantes, em qualquer programa de pesquisa, pois de nada valem análises químicas sofisticadas e extremamente rigorosas de suas variáveis, se as amostras coletadas não são representativas da área em estudo (CHUNG; CHONG; VARSA, 1995).

A geoestatística surgiu para o estudo de variáveis regionalizadas, ou seja, o estudo de uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com continuidade aparente e cujos valores são relacionados com a posição espacial que ocupam. Oferece técnicas para a elaboração de mapas do comportamento de variáveis georreferenciadas, utilizando o método de interpolação de informações a partir de resultados obtidos em locais convenientemente amostrados e modelados em um semivariograma experimental (FARACO et al., 2008).

Na agricultura brasileira, atualmente, grandes áreas são consideradas homogêneas; nelas a necessidade média de utilização dos insumos promove o uso de doses iguais de fertilizantes, desconsiderando a variabilidade espaço-temporal, podendo sobrecarregar uma

gleba que é fértil e não atingir níveis ótimos para alta produtividade em outras glebas deficientes. Como consequência, há desbalanço no uso de fertilizantes, comprometendo a produtividade das lavouras e tornando alto o custo de produção. Essa condição pode ocasionar menor produção da área e maior impacto ambiental. Se variabilidade espacial de atributos químicos puder ser medida e registrada, essas informações poderão ser usadas para otimizar as aplicações em cada ponto, aumentando a produtividade e diminuindo problemas ambientais (MACHADO et al., 2007).

O solo, por mais uniforme que seja, apresenta variações nos atributos físicos e químicos. Mesmo em áreas consideradas homogêneas, até pertencentes a uma mesma classe de solo, existe variação espacial de determinados atributos a curtas distâncias, em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas. Considerando que essa variabilidade deve, necessariamente, ser incorporada aos procedimentos e técnicas aplicados na agricultura, faz-se necessário conhecê-la para aperfeiçoar a aplicação de corretivos, fertilizantes, água, etc. e reduzir as despesas com coletas de amostras no campo e, conseqüentemente, com análises laboratoriais. Em se tratando de experimentos no campo, o conhecimento sobre a variabilidade é importante porque, em muitos casos, ela pode influenciar a interpretação de efeitos de tratamentos (SILVA et al., 2003).

Os princípios básicos da experimentação, estabelecida por meio do método estatístico clássico, consideram que a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória, admitindo-se que seus atributos apresentem distribuição de frequência normal (SANTOS; VASCONCELOS, 1987). Entretanto, os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial, necessitando, portanto, de uma análise geoestatística (MACHADO et al., 2007).

A geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. O estudo da variabilidade espacial pode ser feito em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solo (BERG; KLAMT, 1997, COUTO; KLAMT; STEIN, 2000), e em áreas menores (ALBUQUERQUE; REINERT; FIORIN, 1996 SOUZA; COGO; VIEIRA, 1998, OLIVEIRA et al., 1999, BERTOLANI; VIEIRA, 2001).

A formação dos solos não é homogênea ao longo do tempo, tampouco no espaço, e muitas vezes suas propriedades não variam ao acaso, mas apresentam dependência espacial ou temporal. Essa dependência pode invalidar o uso de análises estatísticas convencionais em experimentos de campo, especialmente naqueles que utilizam grandes parcelas. Desse modo,

é importante o conhecimento do comportamento espacial ou temporal da variável em estudo, para se escolher o modelo matemático adequado (BERNER et al., 2007).

Coletar amostras ao acaso, sem conhecer sua posição relativa no espaço, permite tão somente detectar tal variação por meio da variância e do coeficiente de variação (SOUZA; COGO; VIEIRA, 1999). Para que se possa conhecer a forma da variação (comprimento, largura e direção) e tirar proveito dela, é importante que se conheçam as coordenadas dos pontos de amostragem (BERNER et al., 2007).

O fato de as amostras estarem sendo tomadas de maneira regionalizada não impede que se obtenham as estimativas de média e variância e que sejam analisados e comparados os resultados classicamente, mas, em adição, pode-se avaliar a estrutura da variância e a dependência entre amostras. Regionalização significa que as amostras possuem coordenadas que identificam suas posições em relação a uma origem arbitrária. Se detectada tal dependência, a análise estatística proposta por Fisher (1956), baseada na média e no desvio-padrão, não é aplicável, haja vista exigir a independência entre amostras (BERNER et al., 2007).

Atualmente, os estudos geoestatísticos vêm contribuindo muito com a pesquisa da variabilidade espacial, principalmente aquela voltada aos atributos físicos do solo e da produtividade vegetal (CARVALHO; SORATTO; FREDDI, 2002, SANTOS et al., 2006). Vários estudos têm demonstrado que a variabilidade das propriedades do solo apresenta dependência espacial, ou seja, o valor em qualquer ponto amostrado depende de algum modo, de seu vizinho (VIEIRA, 1997, CARVALHO et al., 2001, EGUCHI; SILVA; OLIVEIRA, 2002, SOUSA et al., 2004 a,b). A partir dos resultados amostrais, é possível gerar uma superfície contínua, expressa por mapas, por meio de métodos de interpolação. Nesse caso, a geoestatística é usada como ferramenta auxiliar, visto que permite estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreve a variabilidade espacial dos resultados, o qual é usado no processo de interpolação. É importante que o modelo ajustado represente a tendência da semivariância em relação à distância, sendo a krigagem o método de interpolação que confere maior exatidão às estimativas obtidas (JOHANN et al., 2004). A krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos resultados e produz valiosa informação sobre a distribuição da estimativa do erro (ANGELICO, 2006).

Segundo Vieira (2000), a hipótese menos restritiva para o uso da geoestatística é a hipótese intrínseca, segundo a qual, a função do semivariograma existe e a variância das diferenças depende apenas da distância entre as amostras. Em situações reais, no entanto, problemas como a existência de tendência nos resultados podem influir nas análises e devem

ser corrigidos para evitar falsas conclusões. Uma das alternativas para retirada da tendência dos resultados é o procedimento descrito por Davis (1986), segundo o qual pode-se ajustar um polinômio de primeiro ou segundo grau, para os valores da propriedade, de acordo com as coordenadas, e fazer com que o resíduo seja obtido pela diferença entre valor medido e valor do polinômio em cada ponto. Numa análise geoestatística, os valores de alcance dos semivariogramas experimentais informam as distâncias mínimas entre amostras, para estas serem consideradas independentes. A independência ou não dos pontos amostrados é fundamental para escolha do teste estatístico a ser aplicado.

Os atributos físicos e químicos do solo influenciam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Desta forma, a avaliação da variabilidade espacial destes atributos têm-se tornado importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo, que procuram aumentar a produtividade agrícola (TRANGMAR et al., 1985).

A geoestatística tem sido aplicada no estudo da distribuição espacial das propriedades físicas do solo, tais como da densidade do solo, da macroporosidade, da microporosidade, da porosidade total e o do teor de água do solo, que têm apresentado dependência espacial descritas por semivariogramas simples (VIEIRA; NIELSEN; BIGGAR, 1981, VAUCLIN et al., 1983, GONÇALVES; FOLEGATTI; DA MATA, 2001, SOUZA et al., 2001, CARVALHO; TAKEDA; FREDDI, 2003, SOUZA et al., 2004, GREGO; VIEIRA, 2005, FIDALSKI et al., 2006). Por outro lado, Gonçalves (1997) e Guimarães (2000) verificaram ausência de dependência espacial da densidade do solo nos seus ambientes de estudo, e atribuíram tais resultados à malha muito ampla, o que estabeleceu o efeito pepita puro.

A krigagem ordinária, que é um método de interpolação de resultados, usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do espaço analisado, ao qual o modelo do semivariograma foi ajustado, sem tendência e com variância mínima. Esse estimador nada mais é do que uma média ponderada dos valores observados (MOTOMIYA; CORÁ; PEREIRA, 2006).

Solos de mesma classe, quando submetidos a manejos diferenciados, podem apresentar diferenças significativas em suas propriedades no espaço (CORÁ, 1997, BOUMA et al., 1999). No Brasil, grandes áreas agrícolas sobre Latossolos, considerados homogêneos do ponto de vista pedológico e de manejo, apresentam diferenças na distribuição espacial de seus atributos de acordo com o manejo ao longo de sucessivos cultivos (ARAÚJO et al., 2000, CORÁ et al., 2000)

A partir do conhecimento da variabilidade espacial de propriedades do solo, é possível descrever a correlação espacial entre essas variáveis, denominada correlação cruzada. Esta correlação é obtida por meio do semivariograma cruzado e do ajuste de um modelo matemático que descreve a sua estrutura de variação (TRANGMAR et al., 1985, WEBSTER, 1985, McBRATNEY; WEBSTER, 1986, ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). A correlação espacial tem sido utilizada em estudos relacionando a textura do solo, a produção de biomassa e a produtividade de grãos (MILLER; SINGER; NIELSEN, 1988).

Em algumas situações é interessante estimar determinada variável do solo em relação a outra, cujo custo e/ou tempo de determinação é menor. Isto pode ser feito por meio de um semivariograma cruzado, também denominado de co-krigagem (GUIMARÃES, 2004).

Carvalho e Queiroz (2002) utilizaram a co-krigagem para estudar a variabilidade espacial de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico, estabelecido sob preparo convencional e cultivado com o feijoeiro comum durante o ano agrícola de 1999/2000, buscando fornecer subsídios para o planejamento da área agrícola experimental. Os atributos estudados foram: macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência mecânica a penetração (RP) e umidade do solo (UG). A coleta dos resultados foi efetuada com os pontos amostrais dispostos segundo uma malha com 103 pontos, nas profundidades de 0-5 cm (superfície) e 5-20 cm (subsuperfície). Os resultados revelaram que a variabilidade pesquisada foi: (a) muito alta, para a RP, em ambas as profundidades, e, para a MA, na subsuperfície; (b) alta, para a MA, na superfície; (c) média, para a UG, em ambas as profundidades, e (d) baixa, para a MI, PT e DS, em ambas as profundidades. Todos os atributos do solo apresentaram dependência espacial, com exceção da MI na superfície. Desta forma, na camada superficial, a PT, DS, RP, MA e UG apresentaram, respectivamente, os alcances de 8,6; 13,1; 15,2; 15,8 e 18,4 m. Na subsuperfície, a DS, UG, RP, MI, MA e PT atingiram, respectivamente, os alcances de 1,0; 9,1; 14,4; 18,4; 19,2 e 23,7 m.

Com a preocupação de verificar em que situação pode ser utilizada a co-krigagem, ou seja, qual o nível de correlação necessário para que as estimativas sejam consistentes, Landim (1998) selecionou resultados de penetração padronizada (SPT), obtidos no sítio urbano de Bauru (SP), a partir de 92 sondagens a percussão. Constatou que, à medida que os coeficientes de correlação espacial entre as variáveis diminuíram, os erros associados à estimação da variável que se quer estudar aumentaram. Esse resultado apontou para um cuidado especial que se deve ter com o nível de correlação entre as variáveis enfocadas, antes de se iniciar uma aplicação da co-krigagem (KITAMURA; CARVALHO; LIMA, 2007).

Estudando a otimização amostral de atributos de Latossolos e considerando aspectos solo-relevo, Souza et al. (2006) relataram que a utilização do alcance do semivariograma diminuiu o número de amostras a serem coletadas para avaliação de atributos químicos como teores de Ca, P, K, valores da CTC e saturação por bases, quando comparados à fórmula de Cline. Determinaram-se também o número de subamostras necessárias para compor uma amostra composta e estimar o valor médio das variáveis usando a fórmula descrita por Cline (1944):

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} \cdot CV}{D} \right)^2 \dots\dots\dots(1)$$

em que n é o número mínimo de amostras; t_{α} é o valor do teste t de Student para o nível de probabilidade de 95%; CV é o coeficiente de variação e D é a porcentagem de variação em torno da média (5 %). Relataram ainda que, para garantir a dependência espacial, os pontos amostrais devem ser coletados a uma distância equivalente a metade do alcance.

Motomiya, Corá e Pereira (2006) usaram a krigagem na avaliação de indicadores de fertilidade do solo e constataram a possibilidade de identificar regiões com diferença de fertilidade na área experimental, o que possibilita um programa de manejo regionalizado do solo, seguindo princípios da agricultura de precisão, ou seja, a aplicação de insumos e práticas agrícolas de acordo com as necessidades específicas de cada local da área.

O solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade originadas exclusivamente pelo efeito antrópico da agricultura (CARVALHO; TAKEDA; FREDDI, 2003). Além do que, existe certa heterogeneidade dos atributos químicos e físicos de um solo, mesmo em uma área considerada uniforme, segundo suas características visíveis de campo, tais como: topografia, cor do solo e vegetação. Para que a amostragem do solo represente, com exatidão, a sua fertilidade, é necessário o conhecimento dessa variabilidade, pois só assim as recomendações de calagem e adubação não estariam comprometidas (SANTOS; VASCONCELLOS, 1987, SILVEIRA et al., 2000).

A eficácia das estratégias de amostragem do solo pode ser aumentada com a incorporação de um modelo de variabilidade espacial. Souza, Cogo e Vieira (1997) relataram que o conhecimento do alcance da dependência espacial dos atributos do solo pode ser um critério para definir o intervalo das amostragens. Porém, estes valores dependem da escala, da intensidade de coleta e do manejo da área. Portanto, a característica do relevo, como a forma, pode ser de extrema importância na definição de esquemas de amostragem, bem como na definição de zonas de manejo físico e químico do solo.

Segundo Carvalho, Takeda e Freddi (2003), a variabilidade espacial nos atributos do solo pode ser influenciada pelos seus fatores intrínsecos (fatores de formação, que são o material de origem, relevo, clima, organismos e tempo) e pelos fatores extrínsecos, normalmente relacionados com as práticas de manejo. Usualmente, uma forte dependência espacial nos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos (CAMBARDELLA et al., 1994).

Segundo Paz, Taboada e Gomez (1996), o pH, o conteúdo de C orgânico, a textura e a capacidade de troca catiônica apresentaram menor variabilidade que os teores de macro e micronutrientes do solo. Souza (1992) relatou que inúmeros trabalhos têm demonstrado que os sistemas de manejo conservacionistas criam um ambiente no solo diferente do encontrado no sistema convencional, resultante dos efeitos dos resíduos superficiais e da reduzida movimentação do solo. Como resultado, tem sido encontrado um acúmulo superficial de fertilizantes nos sistemas conservacionistas (Silveira et al., 2000). Em razão do não revolvimento do solo, como ocorre no SPD, espera-se maior variabilidade nos resultados (MONTEZANO; CORAZZA; MURAOKA, 2006).

A ação dos sistemas de preparo do solo pode ser avaliada por meio de técnicas estatísticas usuais, como a análise da variância e os testes de média. No entanto, o padrão espacial de um determinado solo, bem como a modificação que lhe é imposta, pelos tratamentos adotados, não podem ser avaliados por meio desses métodos. Da mesma forma, a correlação linear entre a produtividade de uma cultura e um determinado atributo do solo, pode ser avaliada por meio da análise da regressão. A correlação espacial entre estas variáveis, no entanto, só pode ser avaliada por meio de técnicas da geoestatística (GONÇALVES et al., 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de origem dos resultados

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FE/UNESP), localizada no município de Selvíria (MS), entre as latitudes de 20°18'05''S e 20°18'28''S e as longitudes de 52°39'02''W e 52°40'28''W. Sua precipitação média anual é de 1300 mm, enquanto que a temperatura média é de 23,7°C. O tipo climático é Aw, segundo Koeppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Os resultados climáticos referentes ao período de condução do experimento estão no APÊNDICE A.

O solo no qual a malha experimental foi instalada, classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA-EMBRAPA, 2006), é um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico argiloso, A moderado, distrófico, álico, caulínítico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido (Typic Acrustox), com declive homogêneo de 0,025 m m⁻¹.

3.2 Caracterização inicial do solo pesquisado

O solo, no qual foi estabelecida a pesquisa, estava sendo utilizado em rotação em SPD, o qual foi ocupado por milho safrinha (*Zea mays*) (2004), com posterior semeadura de soja (*Glycine max*) (2004/2005), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) (2005), soja (2005/2006) e guandu anão (*Cajanus cajan*) (2006). Portanto, com objetivo de caracterizar a malha inicialmente, isto é, antes da semeadura da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e da instalação

da malha experimental (nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), foi efetuado um levantamento físico (densidade do solo, macro, micro e porosidade total), como também da situação de sua fertilidade (Quadros 1 e 2). Para a avaliação física do solo foram coletados vinte pontos amostrais, sendo a densidade do solo (DS) determinada pelo Método do Anel Volumétrico, relacionada em $[\text{kg dm}^{-3}]$ (EMBRAPA, 1997). Para a macroporosidade $[\text{m}^3 \text{ m}^{-3}]$, microporosidade $[\text{m}^3 \text{ m}^{-3}]$ e a porosidade total $[\text{m}^3 \text{ m}^{-3}]$ foi utilizado o Método da Mesa de Tensão. Da mesma forma, para caracterização química do solo, nos 20 pontos amostrais, as tradagens nas três profundidades foram realizadas com um trado de caneca.

Quadro 1 – Características químicas do solo antes da implantação do experimento.

Profundidade (m)	P_{resina}	MO	pH CaCl_2	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m
	mg dm^{-3}	g dm^{-3}		----- $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----							%	
0,00 - 0,10	12,5	18,0	5,1	3,2	19	11	22,2	0,5	33,3	55,5	60	0,9
0,10 - 0,20	6,7	14,1	4,6	1,9	10	6	25,5	1,8	17,9	43,4	41	4,0
0,20 - 0,30	3,5	11,8	4,7	1,7	10	6	21,8	1,0	17,7	39,5	45	2,5

Quadro 2 – Caracterização da densidade do solo (DS), macro (MA), micro (MI) e porosidade total (PT) do solo antes da implantação do experimento.

Profundidade (m)	DS	MA	MI	PT
	kg dm^{-3}	----- $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ -----		
0,00 - 0,10	1,314	0,147	0,334	0,481
0,10 - 0,20	1,487	0,078	0,345	0,425
0,20 - 0,30	1,477	0,067	0,357	0,425

3.3 Implantação e condução da planta-teste pesquisada

A planta-teste pesquisada foi a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu semeada em 26 de janeiro de 2007 em área irrigada (pivô central), após a dessecação das plantas daninhas da área com o herbicida glyphosate, na dose de 5 L ha^{-1} do produto comercial. O capim foi

semeado com espaçamento entre linhas de 0,17 m, com gasto de 12 kg de sementes ha^{-1} , ou seja, 10-20 sementes viáveis m^{-2} . As plantas foram conduzidas por 46 dias (12/03/07) e ceifadas com auxílio de uma roçadora, a uma altura de 0,25 m para nivelamento da área. Após 52 dias do manejo inicial as plantas foram dessecadas (02/05/07) com o herbicida glyphosate, na dose de 5 L ha^{-1} do produto comercial. No dia anterior à dessecação foi realizada a coleta de solo para avaliação dos atributos físicos e químicos, bem como da coleta de plantas para determinação da produção de massa fresca, produção de massa seca e teor de proteína bruta.

3.4 Implantação e caracterização da malha experimental utilizada para coleta dos atributos pesquisados

Foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, num lançante da pastagem de *B. brizantha*, estabelecido entre dois terraços agrícolas (APÊNDICE B). Para tanto, foi utilizado o nível ótico comum, efetuando-se o estaqueamento global da malha experimental após o manejo (12/03/07) da planta forrageira. A grande malha experimental ficou constituída de cinco linhas e 10 colunas, de formato retangular e contendo 44 pontos amostrais, com espaçamento entre pontos de 10,0 m x 10,0 m, numa área total de 4000 m^2 (100 m x 40 m). Tais eixos, que foram as maiores transeções e contendo 11 pontos cada, tiveram 100 m, cuja hipotenusa foi de 107,7 m. Entretanto, foram alocadas por sorteio, dentro da grande malha, sub-malhas de refinamento da distância entre os pontos, visando detalhar o estudo da dependência espacial dos resultados, para condições do espaçamento entre pontos menores do que 10,0 m. Cada sub-malha ficou posicionada entre quatro pontos da grande malha, constituindo-se de um ponto no seu centro e mais quatro estabelecidos no sentido dos eixos cartesianos e na metade entre cada par, com espaçamentos de 5,0 e 1,67 m entre eles, totalizando 124 pontos.

3.5 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

Os atributos pesquisados foram do solo e da planta, todos individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral (estaca) da malha experimental. Os atributos do solo

foram: a) densidade da partícula (DP), b) densidade do solo (DS), c) macroporosidade (MA), d) microporosidade (MI), e) porosidade total do solo determinada (PTd), f) porosidade total do solo, calculada pela expressão: $PTc = [1-(DS/DP)]$ (PTc), g) resistência mecânica à penetração (RP), h) umidade gravimétrica (UG), i) umidade volumétrica (UV), j) teor de fósforo (P), l) teor de matéria orgânica (MO) e m) pH em CaCl₂ (pH). Os atributos da planta foram: produtividade de massa fresca (MF) e seca (MS) da *Brachiaria brizantha* e o seu teor de proteína bruta (PB).

Os atributos do solo foram calculados em função de amostras coletadas no entorno da estaca que determinaram o ponto amostral no campo. Tais amostras de solo foram originadas de monólitos com estrutura indeformada para a DS, MA, MI, PTd e UV ao passo que para a DP, UG, P, MO e pH foram com estrutura deformada, com auxílio de um trado de caneca. Elas foram coletadas em três profundidades do solo, a saber: a) zero-0,10 m, b) 0,10-0,20 m, e c) 0,20-0,30 m. Desta forma, a densidade do solo (DS) foi determinada pelo Método do Anel Volumétrico, enquanto que a umidade gravimétrica do solo (UG) foi determinada com base na massa (EMBRAPA, 1997). Para a macroporosidade, microporosidade e a porosidade total determinada foi utilizado o Método da Mesa de Tensão. Todas foram determinadas conforme Embrapa (1997). A densidade da partícula foi determinada pelo método do álcool (EMBRAPA, 1997). A UV foi determinada pelo seguinte cálculo, relacionado em Kiehl (1979): $UV=UG \times DS$(2)

Os resultados da RP foram obtidos com o penetrômetro de impactos (STOLF, 1991), calculados segundo a expressão contida em Souza et al. (2001): $RP=\{5,581+6,891 \times [N/(P-A) \times 10]\} \times 0,0981$(3) onde: **RP** é a resistência mecânica à penetração, **N** é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para obtenção da leitura, **A** e **P** são, respectivamente, as leituras antes e depois da realização dos impactos [cm].

A matéria orgânica foi determinada pela seguinte expressão: $MO = C \times 1,724 \times 10$(4)

onde : **MO** é o teor de matéria orgânica do solo e **C** o teor de carbono orgânico. Assim, o carbono orgânico foi determinado pelo método colorimétrico da combustão úmida (RAIJ et al., 1987). Para determinação do teor de P e valor pH em CaCl₂, também foi empregada a metodologia constante em Raij et al. (1987). Todos eles foram determinados no Laboratório de Análises Físicas e Químicas do Solo da Faculdade de Engenharia-FE/UNESP/Campus de Ilha Solteira.

As produtividades de massa fresca e seca da *Brachiaria brizantha* também foram obtidas e calculadas em função de amostras originadas no entorno do ponto amostral estaqueado. Tais amostras foram originadas da coleta de todas as plantas, no ponto amostral, utilizando-se para demarcação de área, um quadrado metálico de 0,50 x 0,50 m (0,25 m²). As plantas foram ceifadas manualmente (à altura de 0,25 m), pesadas para determinação da massa fresca e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até massa constante, para determinação da massa seca por ponto amostral. Das amostras de massa seca efetuou-se a determinação do teor de N (digestão sulfúrica) e calculou-se o teor de proteína bruta (PB = N x 6,25), conforme metodologia contida em Silva e Queiroz (2002).

Considerando que o solo estudado foi estratificado em três profundidades, a relação final dos seus 36 atributos foi a seguinte: a) camada de 0,00-0,10 m: DP1, DS1, MA1, MI1, PTd1, PTc1, RP1, UG1, UV1, P1, MO1 e pH1; b) camada de 0,10-0,20 m: DP2, DS2, MA2, MI2, PTd2, PTc2, RP2, UG2, UV2, P2, MO2 e pH2, e c) camada de 0,20-0,30 m: DP3, DS3, MA3, MI3, PTd3, PTc3, RP3, UG3, UV3, P3, MO3 e pH3.

3.6 Análise estatística dos atributos estudados

A análise estatística dos atributos estudados foi realizada no Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FE/UNESP). Ficou constituída na análise descritiva inicial, análise de correlação e da análise geoestatística dos resultados.

3.6.1 Análise descritiva inicial dos resultados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva inicial dos resultados pelo emprego da estatística clássica. Utilizando-se o SAS (SCHLOTZHAYER; LITTEL, 1997). Foram calculados a média, mediana, moda, erro padrão da média, valores mínimo e máximo, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Posteriormente, realizou-se a análise da distribuição de frequência desses atributos. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos resultados, foi

utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele, a estatística W testa a hipótese nula, que julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal. Assim, no caso de resultados transformados na forma logarítmica ($y = \log x$), W testa a hipótese nula de que os valores y_i provêm de uma distribuição normal, isto é, os resultados não transformados (w_i) ajustam-se a uma distribuição lognormal.

A correção dos *outliers* foi realizada anterior à transformação logarítmica dos resultados, atributo por atributo, da seguinte forma, exclusivamente na análise descritiva fornecida pelo SAS. Primeiramente, foi identificada a presença do *outlier*, no gráfico de ramos e folhas e no *boxplot*, pela localização da marca do asterisco com a designação do respectivo valor. Posteriormente, foi confirmada a existência desse *outlier* no gráfico de probabilidade normal. Nele, a presença dos referidos *outliers* é caracterizada pelo posicionamento distanciado da nuvem de pontos amostrais obtidos. Finalmente, a correção do *outlier* foi procedida pelo cálculo da média aritmética dos valores dos pontos circunvizinhos na malha de estudo, em substituição ao valor desse *outlier*.

3.6.2 Análise de regressão

Foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta). Assim, procurou-se selecionar aqueles de maior correlação linear, objetivando analisar aqueles que poderiam apresentar semivariograma cruzado e a conseqüente co-krigagem. Também, conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, foi efetuada a análise de regressão linear múltipla entre as variáveis dependentes da planta e as independentes do solo, objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as maiores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo aumento do coeficiente de determinação. Para tanto, foram utilizados o programa Excel e o pacote computacional SAS.

3.6.3 Análise geoestatística

Para cada atributo, foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, com o pacote computacional *Gamma Design Sofyware* (GEOSTATISTICS, 2004). Foram ajustados semivariogramas simples a todos os atributos estudados, da planta (MF, MS e PB) e do solo (DP1, DP2, DP3, DS1, DS2, DS3, MA1, MA2, MA3, MI1, MI2, MI3, PTd1, PTd2, PTd3, PTc1, PTc2, PTc3, RP1, RP2, RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV2, UV3, P1, P2, P3, MO1, MO2, MO3, pH1, pH2 e pH3). Posteriormente, ajustaram-se semivariogramas cruzados entre os atributos: a) planta *versus* planta e b) planta *versus* solo. O objetivo foi definir os pares de melhor representatividade, isto é, qual o atributo, tido como variável secundária apresentou maior correlação espacial explicativa do atributo tido como variável primária. Por outro lado, para aqueles em que ocorria a ausência de estacionaridade, retirou-se a tendência dos resultados por meio da técnica polinomial. Esta técnica baseia-se no fato da geoestatística ser uma ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos que ocorrem na terra. Dessa forma, uma variável **Z**, que é distribuída ordenadamente no espaço “s”, é tida como uma 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. Assim, por se tratar de variável não-estacionária se decompõe em:

$$\mathbf{Z(s)} = \mathbf{m(s)} + \mathbf{R(s)} \dots \dots \dots (5)$$

onde: **m(s)** é a tendência ou derivada e **R(s)** é o resíduo (MATHERON, 1963).

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. Conforme apresentada por Armesto (1999), as expressões testadas são a linear, a quadrática e a cúbica, relacionadas a seguir:

$$\mathbf{m(x,y)} = \mathbf{a_0} + \mathbf{a_1.x} + \mathbf{a_2.y} \dots \dots \dots (6)$$

$$\mathbf{m(x,y)} = \mathbf{a_0} + \mathbf{a_1.x} + \mathbf{a_2.y} + \mathbf{a_3.x^2} + \mathbf{a_4.y^2} + \mathbf{a_5.xy} \dots \dots \dots (7)$$

$$\mathbf{m(x,y)} = \mathbf{a_0} + \mathbf{a_1.x} + \mathbf{a_2.y} + \mathbf{a_3.x^2} + \mathbf{a_4.y^2} + \mathbf{a_5.xy} + \mathbf{a_6.x^3} + \mathbf{a_7.y^3} + \mathbf{a_8.x^2y} + \mathbf{a_9.y^2x} \dots \dots \dots (8)$$

Dessa forma, a eleição da tendência $\mathbf{m}(s)$, 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 $\mathbf{R}(x,y)$, a partir da equação (9), efetuando-se:

$$\mathbf{R}(x,y) = \mathbf{Z}(x,y) - \mathbf{m}(x,y) \dots \dots \dots (9)$$

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

$$\mathbf{Z}^*(x,y) = \mathbf{m}^*(x,y) + \mathbf{R}^*(x,y) \dots \dots \dots (10)$$

onde: $\mathbf{Z}^*(x,y)$ é a estimativa da variável não-estacionária $Z(s)$, $\mathbf{m}(x,y)$ é a tendência da variável $m(s)$, e $\mathbf{R}^*(x,y)$ é a estimativa do resíduo resultante da krigagem.

Desta forma, foi possível recalculer os semivariogramas, com os resíduos obtidos deste procedimento, de forma a apresentar, agora, os atributos precedidos pelo símbolo £. Portanto, os ajustes dos semivariogramas (simples e cruzados), em função de seus modelos, foram efetuados pela seleção inicial de: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQR**); b) o maior coeficiente de determinação espacial (r^2) e c) o maior avaliador da dependência espacial (**ADE**). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada por meio da avaliação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor rede de krigagem e/ou co-krigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (**Co**), o alcance (**Ao**) e o patamar (**Co+C**). A análise do avaliador da dependência espacial (**ADE**) foi efetuada conforme a seguinte expressão (GEOSTATISTICS, 2004):

$$\mathbf{ADE} = [C / (C + Co)] \cdot 100 \dots \dots \dots (11)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial (%); **C** é a variância estrutural; **C+Co** é o patamar.

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. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos foram obtidos, por meio de interpolação, os mapas de krigagem e de co-krigagem, para análise de dependência e da interdependência espacial entre os atributos pesquisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos resultados

4.1.1 Variabilidade dos atributos estudados

4.1.1.1 Atributos da planta

Apesar da estatística descritiva considerar os resultados independentes espacialmente, Oliveira et al. (1999) consideraram esse tipo de análise de grande importância, pois permite a identificação de resultados atípicos, que podem exercer algum tipo de influência nas análises geoestatísticas, além de auxiliar na comparação com resultados de outras investigações. Portanto, no Quadro 3 está apresentada a análise descritiva inicial dos atributos estudados. 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 massa fresca (MF) e seca (MS) da *Brachiaria brizantha* (MS) apresentou variabilidade muito alta com coeficientes de variação de 32,7 e 32,6%, respectivamente, enquanto que o teor de proteína bruta (PB) apresentou alta variabilidade (20,2%). A variabilidade dos resultados de produtividade de MS ficaram muito acima daquele encontrado por Carvalho et al. (2008), que verificaram baixa variabilidade (8,9%) quando trabalharam com *Brachiaria decumbens* em área de pastagem estabelecida há 15 anos. Portanto, pode-se inferir que a área em SPD do presente trabalho apresentava-se mais heterogênea, pelos diversos cultivos anteriores, em relação ao

monocultivo da pastagem citada. Entretanto, Lima (2007), avaliando a massa seca de forragem de milho, encontrou valor médio (16,3%), e Azenha et al. (2007), trabalhando com sorgo forrageiro, obtiveram valor alto (29,6%) para massa seca de forragem. Para o teor de proteína bruta (CV de 20,2%) diferiu dos resultados de Gerdes et al. (2000) para capim-Marandu que encontraram variabilidade baixa para este atributo (7,28%).

4.1.1.2 Atributos do solo

Em todas as profundidades amostradas do solo, a variabilidade da densidade de partículas (DP) foi baixa, variando de 6,4 a 7,0%. Tais resultados estão de acordo com aqueles de Simões et al. (2006) e Amaro Filho et al. (2007) ao trabalharem com Latossolos Vermelhos Distrófico e Distroférico, com valores de 1,5% e de 2,13 a 2,63%, respectivamente para ambos (Quadro 3).

Conforme pode ser observado no Quadro 3, a densidade do solo (DS) apresentou-se com baixa variabilidade em todos os casos, sendo de 6,6; 4,1 e 4,0% respectivamente, nas três profundidades. Esses resultados assemelham-se aos de Andreotti e Carvalho (2007) com 4,5; 4,3 e 4,8%, em profundidade num Latossolo Vermelho distroférico, de Lima (2007) com 9,8; 3,1 e 4,1%, em profundidade num Latossolo Vermelho distrófico, de Amaro Filho et al. (2007) com 3,44% num Latossolo Vermelho distrófico, de Schaffrath et al. (2008), respectivamente de 6,62% (plantio direto) e 5,75% (preparo convencional) obtidos num Latossolo Vermelho distroférico, de Faraco et al. (2008) com 7,59; 7,69 e 6,42% em profundidade, respectivamente num Latossolo Vermelho distroférico e de Rosa Filho (2008) com 4,6 e 3,9%, em profundidade num Latossolo Vermelho distroférico. Assim verifica-se que este atributo, em Latossolos, independente da condição de cultivo, normalmente apresenta baixa variabilidade.

A macroporosidade (MA), que é um atributo muito dependente do tipo de solo e manejo, apresentou variabilidade entre alta e muito alta, sendo para a camada superficial do solo de 40,3% e para as demais camadas de 27,7 e 20,4% (Quadro 3). Portanto, devido a sua heterogeneidade no solo e alta variabilidade, tais resultados estão de acordo com os de Rosa Filho (2008), que encontrou valores entre muito alto (30,7%) e alto (26,7%) em profundidade. Também Schaffrath et al. (2008) obtiveram valores muito altos para plantio direto (38,6%) e preparo convencional (47,56%), assim como Lima (2007), Andreotti e Carvalho (2007) que

obtiveram valores muito altos (63,0; 41,7 e 37,9%, e 55,0; 55,6 e 51,7%, respectivamente) ambos em profundidade. Megda et al. (2008) constataram valores de médio a alto (12,4, 11,7 e 27,6%).

A microporosidade (MI) apresentou-se com baixa variabilidade na três camadas de solo avaliadas, sendo de 5,8; 4,3 e 5,0% (Quadro 3). Esses resultados assemelham-se aos de Rosa Filho (2008), Megda et al. (2008), Schaffrath et al. (2008), Lima (2007), Andreotti e Carvalho (2007), respectivamente de 3,7 e 3,6% em profundidade, obtida num Latossolo Vermelho distroférico, 6,3; 5,5 e 6,6% em profundidade, num Latossolo Vermelho distroférico, 7,1% em plantio direto num Latossolo Vermelho distroférico, 8,0 e 6,4% nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m respectivamente, num Latossolo Vermelho distrófico e 9,4; 9,2 e 8,6%, em três profundidade num Latossolo Vermelho distroférico. Contudo, esses coeficientes foram diferentes dos verificados por Schaffrath et al. (2008), Lima (2007) no qual o coeficiente foi muito alto (35,3%) em preparo convencional e médio em solo arenoso (12,7%) para camada de 0,00-0,10m, respectivamente.

Para porosidade total determinada (PTd) e porosidade total calculada (PTc) obtiveram diferenças na magnitude dos coeficientes de variação. A primeira apresentou baixa variabilidade (7,4; 4,9 e 4,5%), enquanto a segunda teve média variabilidade (12,0; 12,4 e 13,6%) (Quadro 3). Para a PTc, Rosa Filho (2008), Megda et al. (2008), Amaro Filho et al. (2007), Gomes et al. (2007), Andreotti e Carvalho (2007), encontraram valores de 4,4 e 4,0% em duas profundidade num Latossolo Vermelho distroférico, 3,9; 5,4 e 5,3% num Latossolo Vermelho distroférico, 3,9% num Latossolo Vermelho distrófico, 7,54% num Latossolo Vermelho-Amarelo e 6,5; 6,2 e 1,0% num Latossolo Vermelho distroférico, respectivamente. Para a PTd, Schaffrath et al. (2008), Lima (2007) encontraram valores de 7,4 e 4,0% para plantio direto e preparo convencional e 17,1; 5,6 e 6,6% em profundidade num Latossolo Vermelho distrófico, respectivamente. O que pode-se concluir desses resultados é que o cálculo da PT aumenta a variabilidade, quando comparada com a PT determinada, em virtude da herança de erros das variáveis utilizadas na equação (DS e DP).

Quadro 3: Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do capim-Marandu (52 dias após corte) e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor					Coeficiente			Probabilidade do teste (b)	
	Média	Mediana	Mínimo	Maximo	Desvio Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Atributos da planta										
MF (kg ha ⁻¹)	46176	44600	17200	86200	15091	32,7	-0,146	0,524	0,016	TN
MS (kg ha ⁻¹)	12485	12400	3760	22400	4068	32,6	-0,532	0,293	0,097	NO
PB (%)	10,0	10,0	5,4	15,6	2,023	20,2	-0,023	0,297	0,443	NO
Densidade de partículas										
DP1 (kg dm ⁻³)	2,448	2,461	1,935	2,825	0,158	6,4	0,411	-0,417	0,296	NO
DP2 (kg dm ⁻³)	2,439	2,424	2,030	2,820	0,165	6,8	0,070	0,279	0,084	NO
DP3 (kg dm ⁻³)	2,447	2,451	2,060	2,824	0,171	7,0	-0,634	0,098	0,126	NO
Densidade do solo										
DS1 (kg dm ⁻³)	1,432	1,429	1,228	1,643	0,094	6,6	-0,655	0,050	0,250	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,484	1,486	1,325	1,626	0,061	4,1	0,162	-0,200	0,425	NO
DS3 (kg dm ⁻³)	1,480	1,482	1,330	1,612	0,059	4,0	-0,436	-0,088	0,592	NO
Macroporosidade										
MA1c (m ³ m ⁻³) ^(c)	0,099	0,096	0,034	0,236	0,040	40,3	-0,281	-0,202	0,452	LN
MA2c (m ³ m ⁻³)	0,080	0,078	0,046	0,147	0,022	27,7	-0,285	0,355	0,052	LN
MA3 (m ³ m ⁻³)	0,071	0,071	0,040	0,112	0,014	20,4	-0,089	0,333	0,313	NO
Microporosidade										
MI1 (m ³ m ⁻³)	0,343	0,344	0,293	0,395	0,020	5,8	-0,160	-0,020	0,895	NO
MI2 (m ³ m ⁻³)	0,346	0,347	0,313	0,376	0,015	4,3	-0,613	-0,165	0,122	NO
MI3 (m ³ m ⁻³)	0,359	0,358	0,297	0,396	0,018	5,0	0,112	-0,119	0,172	NO
Porosidade total determinada										
PTd1 (m ³ m ⁻³)	0,442	0,440	0,366	0,537	0,033	7,4	-0,115	0,403	0,200	NO
PTd2 (m ³ m ⁻³)	0,426	0,427	0,382	0,484	0,021	4,9	0,083	0,190	0,494	NO
PTd3 (m ³ m ⁻³)	0,432	0,432	0,387	0,496	0,020	4,5	0,872	0,292	0,123	NO

^(a)MF = massa fresca, MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, PTc = porosidade total calculada, RP = resistência mecânica a penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, P = teor de fósforo, MO = matéria orgânica e valor de pH em CaCl₂; ^(b)DF= Distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN e IN, respectivamente do tipo normal, lognormal, tendendo a normal e indeterminada. ^(c) atributo sucedido da letra "c" teve seu valor multiplicado por 100 e, seguidamente, calculado o valor do respectivo logaritmo decimal; e valores x* da média, mediana, mínimo e máximo retrotransformados por x* = 10^{logx}/100.

... continua

Continuação ... Quadro 3: Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do capim-Marandu (52 dias após corte) e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor					Coeficiente			Probabilidade do teste (b)	
	Media	Mediana	Mínimo	Maximo	Desvio Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Porosidade total calculada										
PTc1 (m ³ m ⁻³)	0,415	0,417	0,285	0,521	0,050	12,0	-0,576	-0,131	0,426	NO
PTc2 (m ³ m ⁻³)	0,390	0,386	0,261	0,517	0,048	12,4	0,134	0,201	0,332	NO
PTc3 (m ³ m ⁻³)	0,395	0,392	0,263	0,548	0,054	13,6	-0,445	0,032	0,515	NO
Resistência mecânica à penetração										
RP1a (MPa)	2,212	2,125	0,923	4,679	0,791	35,7	-0,177	-0,091	0,212	LN
RP2 (MPa)	4,557	4,534	1,513	7,452	1,106	24,3	0,558	0,226	0,071	NO
RP3 (MPa)	6,075	5,054	2,801	12,535	2,470	40,7	-	-	-	IN
Umidade gravimétrica										
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,219	0,218	0,171	0,250	0,014	6,6	0,292	-0,222	0,404	NO
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,217	0,218	0,185	0,251	0,012	5,7	0,277	0,095	0,264	NO
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,216	0,218	0,164	0,244	0,019	8,6	-	-	-	IN
Umidade volumétrica										
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,313	0,313	0,221	0,401	0,033	10,7	0,498	-0,208	0,387	NO
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,320	0,320	0,251	0,370	0,023	7,2	0,536	-0,345	0,115	NO
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,318	0,322	0,225	0,375	0,034	10,6	-	-	-	IN
Teor de fósforo										
P1a (mg dm ⁻³) ^(c)	23,5	22,5	9,0	48,0	8,206	34,9	-0,126	-0,089	0,418	LN
P2a (mg dm ⁻³)	12,2	11,0	4,0	37,0	5,989	49,0	0,197	0,226	0,501	LN
P3a (mg dm ⁻³)	6,6	6,0	1,0	15,0	2,676	40,8	0,737	-0,531	0,072	LN
Teor de matéria orgânica										
MO1 (g dm ⁻³)	29,5	30,0	22,0	36,0	2,792	9,5	0,027	-0,237	0,120	NO
MO2a (g dm ⁻³)	22,2	22,0	18,0	28,0	2,199	9,9	-0,159	0,260	0,504	LN
MO3 (g dm ⁻³)	17,8	18,0	11,0	26,0	2,623	14,7	0,747	0,339	0,019	TN
pH										
pH1	5,2	5,2	4,1	6,4	0,445	8,6	-0,144	0,278	0,184	NO
pH2	4,7	4,7	4,1	5,4	0,262	5,6	0,026	0,380	0,012	TN
pH3a	4,7	4,8	4,3	5,3	0,198	4,2	0,387	0,155	0,282	LN

^(a)MF = massa fresca, MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, PTc = porosidade total calculada, RP = resistência mecânica a penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, P = teor de fósforo, MO = matéria orgânica e valor de pH em CaCl₂; ^(b)DF= Distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN e IN, respectivamente do tipo normal, lognormal, tendendo a normal e indeterminada. ^(c) atributo sucedido da letra "c" teve seu valor calculado pelo respectivo logaritmo decimal; e valores x* da média, mediana, mínimo e máximo retrotransformados por x* = 10^{logx}.

Os atributos resistência mecânica à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG) e volumétrica (UV) apresentaram coeficiente de variação entre baixo e muito alto, sendo a RP o atributo que apresentou maior variabilidade (35,7; 24,3 e 40,7%) nas três profundidades. A variabilidade da UG foi baixa nas três profundidades (6,6; 5,7 e 8,6%), todavia, a UV acompanhou este resultado somente na camada de 0,10-0,20m (7,2%), sendo que nas demais camadas sua variabilidade foi média (10,7 e 10,6%) (Quadro 3). Faraco et al. (2008), em estudo num Latossolo Vermelho distroférico, encontraram valores para RP e UG entre altos (24,5; 21,0 e 25,4%) e médios (15,6; 16,2 e 16,4%), respectivamente. Já Lima (2007), também num Latossolo Vermelho distroférico, encontrou valores entre baixos, médios, altos e muito altos, sendo para RP os valores de 32,2; 9,8 e 32,4% e para UG os valores de 21,7; 13,1 e 8,8%. Também Rosa Filho (2008) constatou média variabilidade para RP (15,6 e 14,3%) e baixa variabilidade para UG (4,4 e 3,0%) e UV (6,1 e 4,5%), ambos em duas profundidades num Latossolo Vermelho distroférico. Essa variabilidade da RP, UV e UG ocorre em função do sistema de manejo, textura do solo e tempo de cultivo e é de difícil padronização do coeficiente de variação quando se compara com trabalhos afins na literatura.

No Quadro 3, as variabilidades dos resultados do teor de fósforo no solo (P), matéria orgânica (MO) e pH em CaCl_2 (pH) apresentaram-se muito inconsistentes. Para o teor de P a variabilidade foi muito alta (34,9; 49,0 e 40,8%) nas diferentes profundidades, uma vez que o elemento é pouco móvel no solo, e sua determinação fica dependente de área fertilizada ou não em cultivos anteriores e da forma de amostragem, como informaram Salviano, Vieira e Sparovek (1998), em que a alta variabilidade para os teores de P pode ser atribuída à aplicação de fertilizantes em linha, ao efeito residual da adubação, à imobilidade do elemento no solo e à exposição de camadas mais pobres desse nutriente, pelo processo de erosão superficial. Assim, tais resultados estão de acordo com os de Machado et al. (2007), Montezano, Corazza e Muraoka (2006), Basso et al. (2007), Souza et al. (2007), Guedes Filho, Vieira e Grego (2008), cuja variabilidade do teor de fósforo encontrado foi de alta a muito alta sendo: 73,5% num Latossolo Vermelho textura muito argilosa, 52,0% num Latossolo, 29,7; 32,4 e 41,8% num Latossolo Vermelho distroférico, 32,1% num Latossolo Vermelho eutroférico textura muito argilosa e 92,5% num Latossolo Vermelho, respectivamente.

Entretanto, para o teor de MO (9,5 e 9,9%) e pH (8,6; 5,6 e 4,2%) a variabilidade foi baixa na maioria das profundidades, com exceção da MO na camada de 0,20-0,30m (14,7%) que foi média. Montezano, Corazza e Muraoka (2006), Machado et al. (2007), Angelico (2006), Basso et al. (2007), Araújo et al. (2007), Guedes Filho, Vieira e Grego (2008), Souza

et al. (2007), Costa, Guedes Filho e Vieira (2008), Carvalho et al. (2008) verificaram para estes atributos (MO e pH) variabilidade entre alta e baixa, como: 16,6% para MO e 3,5% para pH num Latossolo cultivado com milho, 25,7% para MO e 6,0% para pH num Latossolo Vermelho textura muito argilosa, 10,0% para MO e 4,1% para pH, 15,3; 5,4 e 6,1% para MO, num Latossolo Vermelho distroférico, 4,5; 5,0 e 4,8% para pH num Latossolo Vermelho distroférico, 13,5% para MO e 6,9% para pH num Latossolo Vermelho, 6,4% para pH num Latossolo Vermelho eutroférico textura muito argilosa, 7,4 e 6,7% para pH num Latossolo Vermelho eutrófico e 20,1 e 24,6% para MO em profundidade e 4,2 e 4,5% para pH num Latossolo Vermelho distroférico. Novamente, o tempo de cultivo e o sistema de manejo do solo interferem na dinâmica de percolação da MO e da correção da acidez em profundidade, principalmente em SPD.

4.1.2 Distribuição de frequência e valores médios dos atributos estudados

4.1.2.1 Distribuição de frequência dos atributos

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequências do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, o será pela mediana, ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (SPIEGEL, 1985). Assim, para os atributos da planta mostrados no Quadro 3, a distribuição de frequência foi normal (NO) para MS e PB, e tendendo a normal (TN) para MF. Portanto, as respectivas medidas de tendência central destes atributos deverão ser representadas pelos valores médios. Isso porque, eles apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, com coeficiente de assimetria positiva entre 0,293 e 0,524, já os coeficientes de curtose negativos ficaram entre -0,532 e -0,023.

Em contrapartida, os atributos do solo apresentaram uma considerável diversidade de distribuição de frequências dos atributos, sendo estas: a) distribuição normal (NO), para DP, DS, MI, PTd e PTc em todas as camadas do solo, e MA3, RP2, UG1, UG2, UV1, UV2, MO1 e pH1, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,032 e 0,403, assim como a negativa entre -0,020 e -0,417, b) distribuição lognormal (LN), para MA1 e MA2, RP1, MO2, pH3 e

em todas as camadas do solo para o teor de P, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,155 e 0,355, assim como a negativa entre -0,126 e -0,202, portanto, suas medidas de tendência central deverão ser representadas pela mediana, c) distribuição tendendo a normal (TN), para MO3 e pH2, com coeficientes de assimetria positiva de 0,339 e 0,380, e d) distribuição indeterminada (IN), para RP3, UG3 e UV3.

Contudo, e independentemente de tais coeficientes, os atributos que apresentaram distribuição normal foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que a respectiva probabilidade variou entre 0,071 (RP2) e 0,895 (MI1) (Quadro 3). Dessa forma, a distribuição de frequência do tipo normal, obtida para grande parte dos atributos estudados, ficou de acordo com os seguintes autores: a) DP (AMARO FILHO et al., 2007, SIMÕES et al., 2006), b) DS (ROSA FILHO, 2008, FARACO et al., 2008, SCHAFFRATH et al., 2008, LIMA, 2007, ANDREOTTI; CARVALHO, 2007), c) MA3 (BASSO et al., 2007) d) MI (SCHAFFRATH et al., 2008, MEGDA et al., 2008, LIMA, 2007, ROSA FILHO, 2008), e) PTd (SCHAFFRATH et al., 2008, LIMA, 2007), f) PTc (MEGDA et al., 2008, ROSA FILHO, 2008, GOMES et al., 2007), g) RP2 (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004, SOUZA et al., 2006, FARACO et al., 2008, ROSA FILHO, 2008), h) UG1 e UG2 (FARACO et al., 2008, ROSA FILHO, 2008), i) UV1 e UV2 (ROSA FILHO, 2008, MARINS, 2006), j) MO1 (MACHADO et al, 2007, ANGELICO, 2006, GUEDES FILHO, VIEIRA; GREGO, 2008, BASSO et al., 2007), e l) pH1 (ANGELICO, 2006, MACHADO et al, 2007, GUEDES FILHO; VIEIRA; GREGO, 2008, ARAÚJO et al., 2008, SOUZA et al., 2007).

4.1.2.2 Valores médios dos atributos

4.1.2.2.1 Atributos da planta

O valor médio da MF foi de 46176 kg ha⁻¹ (Quadro 3), enquanto que, com rendimento de 27% em massa seca, o valor médio de MS foi de 12485 kg ha⁻¹, o que revela boa produtividade de palha visando a implantação ou manutenção do SPD. Muzilli (1986), afirmou ser necessária a produtividade de 5000 kg ha⁻¹ de MS para o bom manejo de palha neste sistema na região Sul do país, bem como, ao aporte anual de palha para este sistema de

10000 a 12000 kg ha⁻¹ segundo Bayer (1996), Fiorin (1999) citados por Amado (2000) para condições de cerrado. Este valor médio de MS foi inferior em 18,9% ao valor encontrado por Lima (2007) de 14841 kg ha⁻¹, que trabalhou com milho safrinha com a finalidade de produção de massa para forragem destinada à alimentação bovina. Porém, foi superior em 11,2% ao valor encontrado por Basso et al. (2007) de 11093 kg ha⁻¹, que avaliaram o sorgo forrageiro em sistema de plantio direto.

Para o teor de proteína bruta, o valor médio foi de 10,0%, devendo-se salientar que na literatura (BUTOLO, 2002, MARTINS NETTO; DURÃES, 2005) os valores de PB são variáveis com a espécie vegetal, idade, parte da planta avaliada e adubação. Portanto, a simples comparação de resultados do presente trabalho com outros podem levar a interpretações errôneas, uma vez que neste trabalho, a *B. brizantha* (toda a parte aérea) foi ceifada aos 50 dias após o corte de nivelamento (Quadro 3).

4.1.2.2 Atributos do solo

Os valores médios da MI (MI1 de 0,343 m³ m⁻³, MI2 de 0,346 m³ m⁻³ e MI3 de 0,359 m³ m⁻³), PTd (PTd1 de 0,442 m³ m⁻³, PTd2 de 0,426 m³ m⁻³ e PTd3 de 0,432 m³ m⁻³) e PTc (PTc1 de 0,415 m³ m⁻³, PTc2 de 0,390 m³ m⁻³ e PTc3 de 0,395 m³ m⁻³) foram muito semelhantes nas três profundidades de solo (Quadro 3). Em contrapartida, o valor da MA foi decrescendo conforme aprofundamento avaliado nas camadas de solo, como pode ser verificado no Quadro 3, com as medianas de MA1 de 0,096 m³ m⁻³ e MA2 de 0,078 m³ m⁻³, respectivamente, e a média de MA3 de 0,071 m³ m⁻³. Isto demonstra que os valores desses atributos anteriormente citados ficaram aquém daqueles do solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, que deveria apresentar 0,50 m³ m⁻³ de porosidade total, com 0,33 m³ m⁻³ de microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, assim como 0,17 m³ m⁻³ de macroporosidade, responsável pela aeração do solo, conforme Kiehl (1979).

Os valores de macroporosidade encontrados no presente trabalho também indicaram que a segunda e terceira camadas encontraram-se razoavelmente compactadas, uma vez que seus valores ficaram abaixo do valor crítico ideal de 0,10 m³ m⁻³ preconizado por Bayer et al. (1973), Medina (1975), Kiehl (1979).

No levantamento pedológico detalhado dos solos da Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo, localizada em Ribeirão Preto, Oliveira e Moniz

(1975) relataram 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 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e de 0,980 e 1,130 kg dm^{-3} . Portanto, com base nessa caracterização, para a densidade do solo (Quadro 3), os valores médios que foram de 1,432 kg dm^{-3} (DS1), 1,484 kg dm^{-3} (DS2) e 1,480 kg dm^{-3} (DS3), também apresentaram uma magnitude que indicou a presença de compactação do solo nas camadas estudadas. Normalmente no SPD, tal compactação é originada pelo trânsito das máquinas e implementos agrícolas, assim como do tempo de adoção deste sistema, sem que, contudo, seja efetuada uma prática conservacionista do solo que venha a reverter esse problema (ASSIS, 2002).

No presente trabalho os valores médios de DS ficaram de acordo com os obtidos por Rosa Filho (2008) que para DS1 e DS2 obteve média de 1,401 kg dm^{-3} e 1,383 kg dm^{-3} , respectivamente, também num Latossolo Vermelho distroférico. Também, Andreotti e Carvalho (2007), na mesma malha amostral do presente trabalho, entretanto em cultivo anterior, encontraram valores semelhantes DS1 (1,517 kg dm^{-3}), DS2 (1,491 kg dm^{-3}) e DS3 (1,441 kg dm^{-3}) para as camadas do solo de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Entretanto, em SPD, Schaffrath et al. (2008), Faraco et al. (2008) obtiveram valores médios inferiores aos do presente estudo, sendo eles: DS na camada de 0,00-0,20m de 1,110 kg dm^{-3} ; e DS1 de 1,101 kg dm^{-3} , DS2 de 1,118 kg dm^{-3} e DS3 1,077 kg dm^{-3} , respectivamente, e ambos num Latossolo Vermelho distroférico.

Segundo Kiehl (1979), a DP em solos tropicais está na faixa de 2,65 kg dm^{-3} , devido aos seus constituintes minerais. Uma forma de alterar este valor está relacionada com os teores de matéria orgânica no solo. Assim, como este trabalho foi conduzido sob SPD, o gradiente de MO em profundidade (MO1 de 29,5 g dm^{-3} , MO2 de 22,0 g dm^{-3} e MO3 de 17,8 g dm^{-3}) fez com que os valores médios da DP (DP1 de 2,448 kg dm^{-3} , DP2 de 2,439 kg dm^{-3} e DP3 de 2,447 kg dm^{-3}) fossem reduzidos em relação ao valor considerado anteriormente, e foram muito semelhantes entre si nas três camadas avaliadas. Amaro Filho et al. (2007) encontraram valor médio para DP de 2,630 kg dm^{-3} e Simões et al. (2006), em estudos em três áreas, encontraram para DP valores médios de DP1 (2,663 kg dm^{-3}), DP2 (2,660 kg dm^{-3}) e DP3 (2,651 kg dm^{-3}), ambos os estudos desenvolvidos num Latossolo Vermelho distroférico.

Em relação ao teor MO (MO1 de 29,5 g dm^{-3} , MO2 de 22,0 g dm^{-3} e MO3 de 17,8 g dm^{-3}), na média, foram inferiores aos obtidos nas pesquisas desenvolvidas por Montezano, Corazza e Muraoka (2006), Machado et al. (2007), Angelico (2006), Guedes Filho, Vieira e Grego (2008), Carvalho et al. (2008), Basso et al. (2007), que constataram valores médios de

respectivamente $46,8 \text{ g dm}^{-3}$, num Latossolo cultivado com milho; $30,8 \text{ g dm}^{-3}$ num Latossolo Vermelho textura muito argilosa; $36,2 \text{ g dm}^{-3}$ na região próxima à divisa dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul; $30,43 \text{ g dm}^{-3}$ num Latossolo Vermelho, MO1 de $33,8 \text{ g dm}^{-3}$ e MO2 de $25,0 \text{ g dm}^{-3}$, e MO1 de $38,4 \text{ g dm}^{-3}$, MO2 de $31,4 \text{ g dm}^{-3}$ e MO3 de $26,1 \text{ g dm}^{-3}$. Entretanto, cabe salientar que o teor de MO no solo é muito dependente de sua textura, sistema de cultivo, clima e tempo sob o plantio direto.

Bengough, Campbell e O'sullivan (2001) relataram que a condição ideal de umidade do solo, para a coleta dos resultados de resistência mecânica à penetração, deve estar 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 umidade volumétrica na microporosidade variando entre $0,330$ e $0,220 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Portanto, uma vez que a capacidade de campo do solo em questão, determinada por Martins (2002), foi de $0,351 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, deve-se salientar que os resultados da presente pesquisa foram coletados em boas condições de umidade volumétrica do solo, uma vez que seus valores ficaram entre $0,313 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (UV1), $0,320 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (UV2) e $0,318 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (UV3). Por outro lado, quando utilizada a classificação de Arshad; Lowery e Grossman (1996), os altos valores da resistência mecânica à penetração do solo ($2,125$; $4,557$ e $6,075$ MPa, respectivamente para RP1, RP2 e RP3) indicam que o solo estudado encontrava-se compactado, principalmente em profundidade maior do que $0,10 \text{ m}$ (Quadro 3).

A umidade gravimétrica (Quadro 3) apresentou valores de $0,219 \text{ kg kg}^{-1}$ (UG1), $0,217 \text{ kg kg}^{-1}$ (UG2) e de $0,216 \text{ kg kg}^{-1}$ (UG3), ou seja, com valores médios superiores aos descritos por Lima (2007), com UG1 de $0,111 \text{ kg kg}^{-1}$, UG2 de $0,100 \text{ kg kg}^{-1}$ e UG3 de $0,104 \text{ kg kg}^{-1}$, em Latossolo Vermelho arenoso. Em contrapartida, enquanto a UG do solo estudado permaneceu praticamente com o mesma quantidade de água em todas as camadas do solo, Rosa Filho (2008) em estudo num Latossolo Vermelho distroférico, encontrou valores para UG1 de $0,225 \text{ kg kg}^{-1}$ e para UG2 de $0,240 \text{ kg kg}^{-1}$, o que demonstra aumento da umidade em profundidade ao longo do perfil.

Em relação ao teor de fósforo no solo (P), os valores da mediana foram P1 de $22,5 \text{ mg dm}^{-3}$, P2 de $11,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e P3 de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$, mostrando decréscimo do teor, com o aumento da profundidade, uma vez que o elemento é pouco móvel no solo, mesmo em condições de SPD. Na mesma malha amostral, em cultivo anterior, Basso et al. (2007) constataram valores médios semelhantes ao do presente trabalho, com P1 de $20,2 \text{ mg dm}^{-3}$; P2 de $10,8 \text{ mg dm}^{-3}$ e P3 de $6,7 \text{ mg dm}^{-3}$, demonstrando este efeito de diminuição do teor de fósforo. Os autores Montezano, Corazza e Muraoka (2006), Machado et al. (2007), Souza et al. (2007) Guedes Filho, Vieira e Grego (2008) verificaram os valores médios na camada de

0,00-0,20 m: 22,24 mg dm⁻³ num Latossolo cultivado com milho, 17,31 mg dm⁻³ num Latossolo Vermelho textura muito argilosa, 26,4 mg dm⁻³ num Latossolo Vermelho eutroférico textura muito argilosa, 61,66 mg dm⁻³ num Latossolo Vermelho numa área manejada desde 1985 com SPD e sucessão de culturas. Portanto, em função do tipo de solo e manejo da adubação fosfatada em cultivos anteriores há uma grande variação dos teores de P nas camadas do solo.

O pH em CaCl₂ apresentou para pH1, pH2 valores médios de 5,2 e 4,7, enquanto para o pH3, a mediana foi de 4,8. Podem-se observar diferenças praticamente entre a superfície e as camadas de solo em profundidade. Isto pode ser explicado pelo experimento ter sido instalado em uma área em SPD há oito anos, e pela calagem em superfície sem incorporação realizada no ano anterior ao cultivo da planta forrageira, fazendo com que o calcário demonstrasse efeito residual apenas na superfície (0,00-0,10 m). Montezano, Corazza e Muraoka (2006), num Latossolo sob plantio direto desde 1995, obtiveram o pH em CaCl₂ médio de 4,83 na camada de 0,00-0,20m. Souza et al. (2007), num Latossolo Vermelho eutroférico textura muito argilosa, sob cultivo de cana-de-açúcar, relataram valor médio de 5,2.

4.2 Análise de regressão para os atributos estudados

4.2.1 Regressão linear simples

4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos estudados

No Quadro 4 está apresentada a matriz de correlação linear simples entre os atributos da *Brachiaria brizantha* (MF, MS e PB) e do solo (DP, DS, MA, MI, PTd, PTc, RP, UG, UV, P, MO e pH).

4.2.1.1.1 Atributos da planta *versus* atributos da planta

As correlações entre os atributos da planta (Quadro 4) apresentaram significância para o par MS x MF ($r = 0,934^{**}$), havendo uma correlação direta entre eles. O par foi aquele de maior coeficiente de correlação, o que já era esperado, uma vez que a MS nada mais é do que a MF depois de retirada a água.

4.2.1.1.2 Atributos da planta *versus* atributos do solo

A correlação entre a MF e os atributos do solo (Quadro 4) apresentou significância exclusivamente para os pares: 1) MF x DS3 ($r = 0,185^*$), 2) MF x RP2 ($r = -0,225^*$), 3) MF x RP3 ($r = -0,292^{**}$), 4) MF x UG2 ($r = 0,208^*$), 5) MF x UG3 ($r = 0,181^*$), 6) MF x UV3 ($r = 0,222^*$), 7) MF x P2 ($r = 0,256^{**}$), 8) MF x P3 ($r = 0,192^*$), 9) MF x MO3 ($r = 0,181^*$) e 10) MF x pH1 ($r = -0,224^*$). Nos pares MF x DS3, MF x UG2, MF x UG3, MF x UV3, MF x P2, MF x P3 e MF x MO3 houveram correlações diretas, indicando que quando ocorreu aumento dos atributos do solo houve o mesmo com a MF. Uma constatação importante a se destacar é o fato de que a correlação entre a MF com os atributos do solo foi evidenciada nas camadas de 0,10 a 0,30 m. Uma explicação bastante plausível para este resultado está relacionada com o crescimento e agressividade das raízes da *Brachiaria brizantha* que possui como característica marcante o poder de crescimento radicular em profundidades abaixo da camada arável (0,0 a 0,20 m). Devido a este aprofundamento do sistema radicular e a correlação positiva da MF com o teor de P e umidade do solo, fica caracterizada uma provável maior eficiência de absorção, tanto de água quanto de nutrientes, o que pode explicar, em parte, o aumento da produtividade de forragem. Tal fato apresentou-se de forma teoricamente coerente, uma vez que no Quadro 3, o valor médio para DS3 foi de $1,480 \text{ kg dm}^{-3}$, sendo distante aos níveis críticos da densidade do solo, difundidos por Bowen (1981), que considerou valores em torno de $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos franco-argilosos e argilosos, e de $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos arenosos, como tendo potencial de afetar o crescimento das raízes e conseqüentemente a produtividade vegetal.

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). 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 foram 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).

No Quadro 4, as correlações da MS com os atributos do solo apresentaram significâncias entre os pares MS x DS3 (r = 0,204*), MS x PTd3 (r = -0,205*), MS x RP2 (r = -0,242**), MS x RP3 (r = -0,301**), MS x UV3 (r = 0,193*), MS x P2 (r = 0,238**) , MS x P3 (r = 0,283**), MS x MO3 (r = 0,204*) e MS x pH1 (r = -0,231**). A relação inversa dos pares MF x RP2, MF x RP3, MS x RP2 e MS x RP3 evidenciou que com o aumento da RP houve uma diminuição da MF e por conseqüência da MS, proporcionada pelo aumento da compactação do solo na camada de 0,10-0,30 m de profundidade. Portanto, ocorreram condições adversas ao crescimento radicular, uma vez que as raízes da *Brachiaria spp.* apresentam maiores concentrações de raízes nas camadas mais profundas, se não forem superpastejadas. Chaieb et al. (1996), trabalhando com o capim *Cenchrus ciliaris*, em dois a três cortes (simulação de pastejo leve), demonstraram que o sistema radicular do capim permaneceu superficial, com cerca de 58 a 67% das raízes localizadas nos primeiros 15 cm da camada superficial de solo. No entanto, para as gramíneas *Digitaria commutata* e *Stipa lagascae*, houve aprofundamento das raízes, localizando-se 68 a 86% delas a 30 cm de profundidade. Entretanto, quando somente um corte foi realizado, todas as três espécies se comportaram da mesma forma em relação ao tratamento controle (ausência de corte ou crescimento livre), ou seja, 85% do sistema radicular posicionou-se nos primeiros 50 cm da camada de solo e os 15% restantes entre 50 e 75 cm.

No caso de plantas forrageiras tropicais, padrão semelhante de resposta foi relatado por Kanno et al. (1999), que ao compararem cinco gramíneas (*Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Panicum maximum* cv. Tanzânia, *Panicum maximum* cv. Tobiata e *Andropogon gayanus* cv. Baeti), concluíram que a *Brachiaria brizantha* é a melhor opção a ser introduzida na rotação cultura-pastagem para melhorar a qualidade do solo.

As correlações diretas entre os pares MS x P2 e MS x P3 (Quadro 4) permitiram inferir que com o aumento do teor de fósforo em profundidade ocorrerá o mesmo com a massa seca da *Brachiaria brizantha*. Segundo Kluthcouski, Stone e Aidar (2003), as pastagens são mais eficientes no aproveitamento do P do solo do que as culturas anuais.

Goedert et al. (1986), citados pelos mesmos autores, mostraram que a *Brachiaria humidicola* foi mais eficiente do que a soja no aproveitamento do fósforo residual de cultivos antecedentes.

Analisando a correlação da PB com os atributos do solo (Quadro 4) pode-se constatar significância entre os pares PB x UG1 ($r = 0,250^{**}$), PB x UG2 ($r = 0,207^*$) e PB x pH1 ($r = -0,233^{**}$). As correlações diretas entre os pares PB x UG1 e PB x UG2, permitiram inferir que com um maior teor de água no solo (UG) ocorreu o aumento na absorção de nitrogênio, e, portanto, como no cálculo da PB este tem relação direta, houve aumento conseqüente deste teor.

4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos estudados

As principais equações de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, no âmbito das correlações estabelecidas para planta *versus* planta e planta *versus* solo são apresentadas no Quadro 5 e nas Figuras 1, 2, 3, 4 e 5. 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 5), a equação de regressão da MS em função da MF foi representada por modelo linear (Eq.1; Fig. 1a), com alto coeficiente de determinação igual a $0,934^{**}$. Portanto, a variabilidade da produção de massa seca da *Brachiaria brizantha* (MS) pode ser explicada em 93,4% da variabilidade dos resultados de produção de massa fresca (MF). Dessa forma, quando a MF variar entre 17200 kg ha^{-1} a 86200 kg ha^{-1} , a MS será de 5190 kg ha^{-1} a 22564 kg ha^{-1} , de maneira linear e ascendente, ou seja, quando aumentar a MF também será aumentada a MS proporcionalmente. Quando tomado o valor médio de 46176 kg ha^{-1} da MF, poderá ser estimada a MS média de 12485 kg ha^{-1} .

Quadro 4: Segundo quadrante da matriz de correlação linear simples entre atributos do capim-Marandu e alguns atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo (a)	Coeficiente de correlação (b)																	
	MF	MS	PB	DP1	DP2	DP3	DS1	DS2	DS3	MA1	MA2	MA3	MI1	MI2	MI3	PTd1	PTd2	
MS	0,934**																	
PB	-0,029 ^{ns}	-0,154 ^{ns}																
DP1	-0,101 ^{ns}	-0,147 ^{ns}	0,030 ^{ns}															
DP2	-0,100 ^{ns}	-0,067 ^{ns}	-0,031 ^{ns}	0,186*														
DP3	0,121 ^{ns}	0,085 ^{ns}	-0,038 ^{ns}	0,128 ^{ns}	0,278**													
DS1	-0,063 ^{ns}	-0,067 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,052 ^{ns}	0,123 ^{ns}	0,145 ^{ns}												
DS2	-0,134 ^{ns}	-0,131 ^{ns}	0,031 ^{ns}	-0,015 ^{ns}	0,014 ^{ns}	0,012 ^{ns}	0,218*											
DS3	0,185*	0,204*	-0,046 ^{ns}	0,105 ^{ns}	-0,114 ^{ns}	-0,087 ^{ns}	0,177*	0,256**										
MA1	0,074 ^{ns}	0,065 ^{ns}	-0,092 ^{ns}	-0,099 ^{ns}	-0,155 ^{ns}	-0,071 ^{ns}	-0,860**	-0,086 ^{ns}	-0,080 ^{ns}									
MA2	0,116 ^{ns}	0,115 ^{ns}	-0,052 ^{ns}	0,129 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,029 ^{ns}	0,012 ^{ns}	-0,637**	0,022 ^{ns}	0,064 ^{ns}								
MA3	0,002 ^{ns}	-0,057 ^{ns}	0,141 ^{ns}	0,013 ^{ns}	0,121 ^{ns}	0,191 ^{ns}	0,173 ^{ns}	-0,064 ^{ns}	-0,449**	-0,021 ^{ns}	0,199*							
MI1	-0,022 ^{ns}	-0,029 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,009 ^{ns}	0,043 ^{ns}	-0,083 ^{ns}	0,317**	-0,115 ^{ns}	0,042 ^{ns}	-0,582**	-0,037 ^{ns}	-0,193*						
MI2	-0,050 ^{ns}	-0,103 ^{ns}	0,024 ^{ns}	-0,062 ^{ns}	0,070 ^{ns}	-0,100 ^{ns}	-0,172 ^{ns}	0,122 ^{ns}	-0,103 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,347**	-0,269**	0,566**					
MI3	-0,110 ^{ns}	-0,166 ^{ns}	0,108 ^{ns}	0,013 ^{ns}	0,076 ^{ns}	-0,121 ^{ns}	-0,170 ^{ns}	0,114 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	0,066 ^{ns}	-0,217*	-0,363**	0,342**	0,602**				
PTd1	0,077 ^{ns}	0,054 ^{ns}	-0,026 ^{ns}	-0,119 ^{ns}	-0,159 ^{ns}	-0,141 ^{ns}	-0,863**	-0,197*	-0,093 ^{ns}	0,869**	0,070 ^{ns}	-0,131 ^{ns}	-0,114 ^{ns}	0,311**	0,279**			
PTd2	0,170 ^{ns}	0,122 ^{ns}	-0,080 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,094 ^{ns}	0,013 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	-0,610**	-0,051 ^{ns}	0,081 ^{ns}	0,667**	0,060 ^{ns}	0,249**	0,274**	0,155 ^{ns}	0,268**		
PTd3	-0,131 ^{ns}	-0,205*	0,167 ^{ns}	-0,056 ^{ns}	0,044 ^{ns}	-0,016 ^{ns}	-0,060 ^{ns}	-0,154 ^{ns}	-0,486**	0,043 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,418**	0,173 ^{ns}	0,249**	0,368**	0,159 ^{ns}	0,241**	

(a) MF, MS, PB, DP, DS, MA, MI e PTd, de 1 a 3, são respectivamente a massa fresca, seca, proteína bruta, densidade da partícula, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total determinada, porosidade total calculada, resistência mecânica a penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, fósforo, matéria orgânica e pH nas profundidades de 1 (0-10 cm), 2 (10-20 cm) e 3 (20-30 cm); (b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

...continua

Continuação ...Quadro 4: Quarto quadrante da matriz de correlação linear simples entre atributos do capim-Marandu e alguns atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)																										
	PTc1	PTc2	PTc3	RP1	RP2	RP3	UG1	UG2	UG3	UV1	UV2	UV3	P1	P2	P3	MO1	MO2	MO3	pHI	pH							
PTc2	0,103 ^{ns}																										
PTc3	-0,014 ^{ns}	0,250**																									
RP1	0,191*	0,012 ^{ns}	0,089 ^{ns}																								
RP2	0,026 ^{ns}	-0,026 ^{ns}	0,101 ^{ns}	0,294**																							
RP3	0,049 ^{ns}	0,097 ^{ns}	0,213*	0,257**	0,622**																						
UG1	-0,089 ^{ns}	0,136 ^{ns}	-0,001 ^{ns}	-0,430**	-0,244**	-0,213*																					
UG2	-0,099 ^{ns}	0,086 ^{ns}	-0,074 ^{ns}	-0,252**	-0,504**	-0,380**	0,626**																				
UG3	-0,046 ^{ns}	0,085 ^{ns}	-0,152 ^{ns}	-0,306**	-0,494**	-0,523**	0,628**	0,624**																			
UV1	-0,340**	0,027 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	-0,356**	-0,132 ^{ns}	-0,243**	0,610**	0,323**	0,491**																		
UV2	-0,192*	-0,239**	-0,165 ^{ns}	-0,314**	-0,438**	-0,389**	0,560**	0,684**	0,601**	0,412**																	
UV3	-0,120 ^{ns}	-0,001 ^{ns}	-0,307**	-0,301**	-0,490**	-0,551**	0,503**	0,561**	0,882**	0,393**	0,620**																
P1	0,042 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	-0,091 ^{ns}	-0,079 ^{ns}	-0,168 ^{ns}	-0,117 ^{ns}	-0,001 ^{ns}	-0,011 ^{ns}	0,016 ^{ns}	-0,027 ^{ns}	0,085 ^{ns}	0,000 ^{ns}															
P2	0,000 ^{ns}	-0,173 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	-0,015 ^{ns}	-0,221*	-0,251**	0,075 ^{ns}	0,106 ^{ns}	0,222*	0,049 ^{ns}	0,177*	0,216*	0,253**														
P3	0,121 ^{ns}	-0,085 ^{ns}	-0,187*	-0,240**	-0,237**	-0,281**	0,071 ^{ns}	0,111 ^{ns}	0,217*	-0,041 ^{ns}	0,018 ^{ns}	0,202*	0,169 ^{ns}	0,306**													
MO1	-0,105 ^{ns}	0,086 ^{ns}	-0,076 ^{ns}	-0,188*	-0,128 ^{ns}	-0,164 ^{ns}	0,220*	0,012 ^{ns}	0,090 ^{ns}	0,266**	-0,001 ^{ns}	0,034 ^{ns}	0,168 ^{ns}	0,103 ^{ns}	0,069 ^{ns}												
MO2	-0,089 ^{ns}	-0,022 ^{ns}	0,039 ^{ns}	-0,221*	-0,136 ^{ns}	-0,205*	0,495**	0,339**	0,342**	0,365**	0,302**	0,241**	0,003 ^{ns}	0,216*	0,176 ^{ns}	0,344**											
MO3	-0,053 ^{ns}	0,030 ^{ns}	-0,126 ^{ns}	-0,135 ^{ns}	-0,120 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	0,255**	0,229*	0,178*	0,111 ^{ns}	0,143 ^{ns}	0,127 ^{ns}	-0,078 ^{ns}	0,161 ^{ns}	0,326**	0,185*	0,340**										
pHI	0,099 ^{ns}	0,110 ^{ns}	0,187*	0,090 ^{ns}	0,221*	0,351**	-0,155 ^{ns}	-0,248**	-0,374**	-0,065 ^{ns}	-0,218*	-0,402**	-0,123 ^{ns}	-0,227*	-0,214*	0,131 ^{ns}	-0,145 ^{ns}	0,092 ^{ns}									
pH2	-0,034 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,163 ^{ns}	0,097 ^{ns}	0,179*	0,252**	-0,027 ^{ns}	-0,021 ^{ns}	-0,140 ^{ns}	-0,026 ^{ns}	-0,105 ^{ns}	-0,220*	-0,069 ^{ns}	-0,164 ^{ns}	-0,077 ^{ns}	-0,117 ^{ns}	-0,041 ^{ns}	0,123 ^{ns}	0,218*								
pH3	-0,043 ^{ns}	-0,017 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,173 ^{ns}	0,095 ^{ns}	0,247**	-0,014 ^{ns}	-0,069 ^{ns}	-0,086 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	-0,053 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	-0,197*	-0,045 ^{ns}	-0,110 ^{ns}	-0,113 ^{ns}	-0,149 ^{ns}	-0,068 ^{ns}	0,103 ^{ns}	0,307 ^{ns}							

^(a) PTc, RP, UG, UV, P, MO e pH, de 1 a 3, são respectivamente a porosidade total calculada, resistência mecânica a penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, fósforo, matéria orgânica e pH nas profundidades de 1 (0-10 cm), 2 (10-20 cm) e 3 (20-30 cm).

Quadro 5: Equação de regressão linear simples e coeficientes do ajuste entre atributos da planta e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Modelo matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					Número da equação
	a	b	c	r	r ²	
<i>Planta x planta</i>						
MS = a + b . MF	8,586.10 ²	2,518.10 ^{-1**}	-	0,934**	-	12
<i>Planta x solo</i>						
MS = a + b . DS3	-8,370.10 ³	1,409.10 ^{4*}	-	0,204*	-	13
MS = a + b . PTd3	3,082.10 ⁴	-4,244.10 ^{4*}	-	-0,205*	-	14
MS = a + b . RP3	1,550.10 ⁴	-4,964.10 ^{2**}	-	-0,301**	-	15
MS = a + b . UV3	5,054.10 ³	2,334.10 ^{4*}	-	0,193*	-	16
MS = a + b . P2	1,052.10 ⁴	1,614.10 ^{2**}	-	0,238**	-	17
MS = a + b . P3	9,658.10 ³	4,297.10 ^{2**}	-	0,283**	-	18
MS = a + b . MO3	6,938.10 ³	3,131.10 ^{2*}	-	0,204*	-	19
MS = a + b . pH1	2,340.10 ⁴	-2,106.10 ^{3**}	-	-0,231**	-	20
MF = a + b . DS3	-2,386.10 ⁴	4,732.10 ^{4*}	-	0,185*	-	21
MF = a + b . RP2	6,016.10 ⁴	-3,069.10 ^{3*}	-	-0,225*	-	22
MF = a + b . RP3	5,701.10 ⁴	-1,783.10 ^{3**}	-	-0,292**	-	23
MF = a + b . UG2	-8,928.10 ³	2,536.10 ^{5*}	-	0,209*	-	24
MF = a + b . UG3	1,458.10 ⁴	1,464.10 ^{5*}	-	0,181*	-	25
MF = a + b . UV3	1,447.10 ⁴	9,959.10 ^{4*}	-	0,222*	-	26
MF = a + b . P2	3,831.10 ⁴	6,444.10 ^{2**}	-	0,256**	-	27
MF = a + b . P3	3,906.10 ⁴	1,081.10 ^{3*}	-	0,192*	-	28
MF = a + b . MO3	2,789.10 ⁴	1,032.10 ^{3*}	-	0,181*	-	29
MF = a + b . pH1	8,544.10 ⁴	-7,578.10 ^{3*}	-	-0,224*	-	30
PB = a + b . UG1 + c . UG1 ²	5,779.10	-4,767.10 ^{2*}	1,175.10 ^{3*}	-	0,094**	31
PB = a + b . UG2	2,682	3,364.10 ^{1*}	-	0,207*	-	32
PB = a + b . pH1 + c . pH1 ²	-2,531.10 ¹	1,463.10 ^{1*}	-1,497*	-	0,091**	33

^(a) MS = massa seca; MF = massa fresca; PB = proteína bruta; DS, PTd, RP, UV, P, MO, pH e UG, de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, porosidade total determinada, resistência mecânica a penetração, umidade volumétrica, teor de fósforo, matéria orgânica, pH e umidade gravimétrica do solo; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

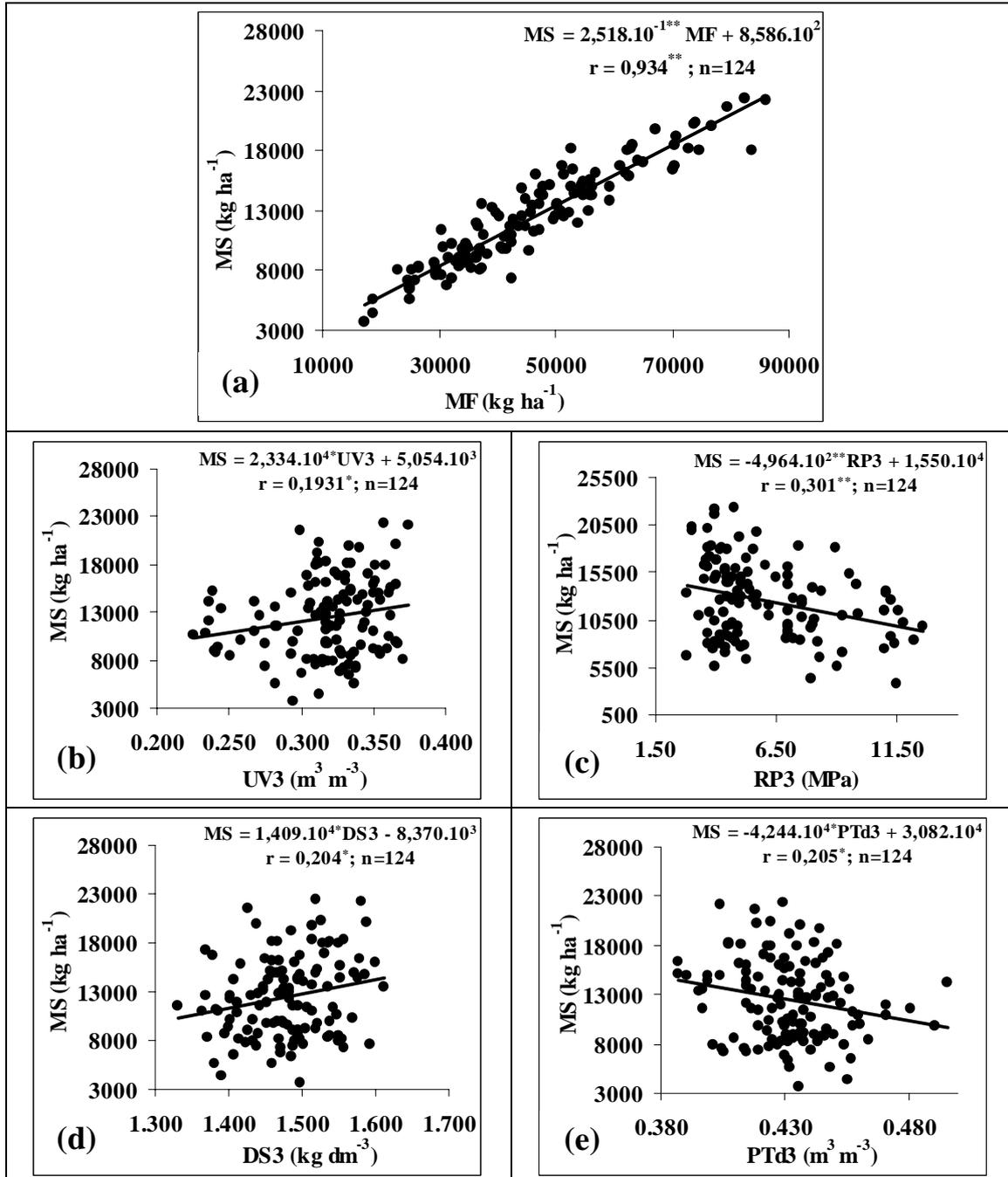


Figura 1: Equações de regressão entre a produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu com alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

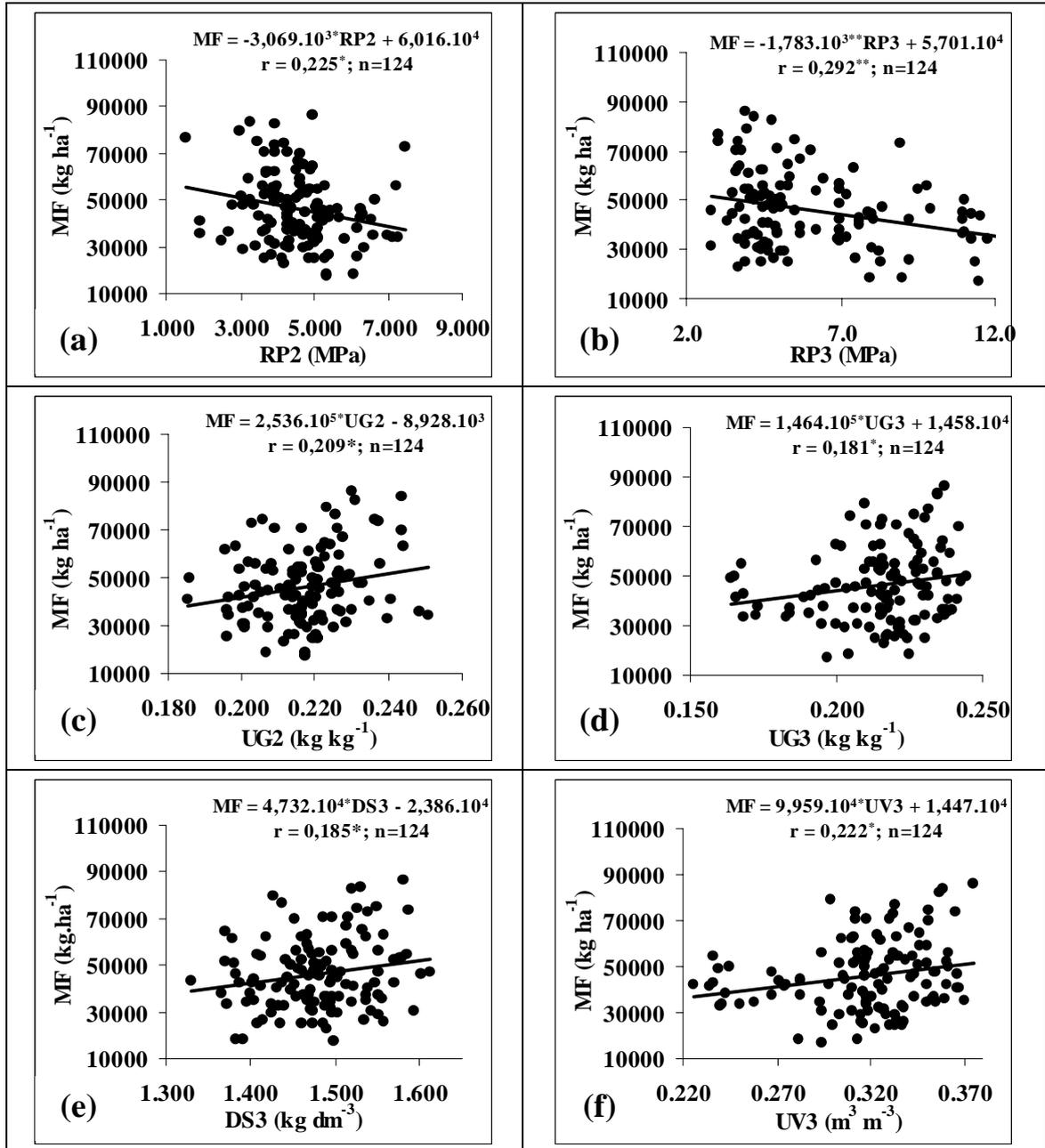


Figura 2: Equações de regressão entre a produtividade de massa fresca (MF) do capim-Marandu com alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

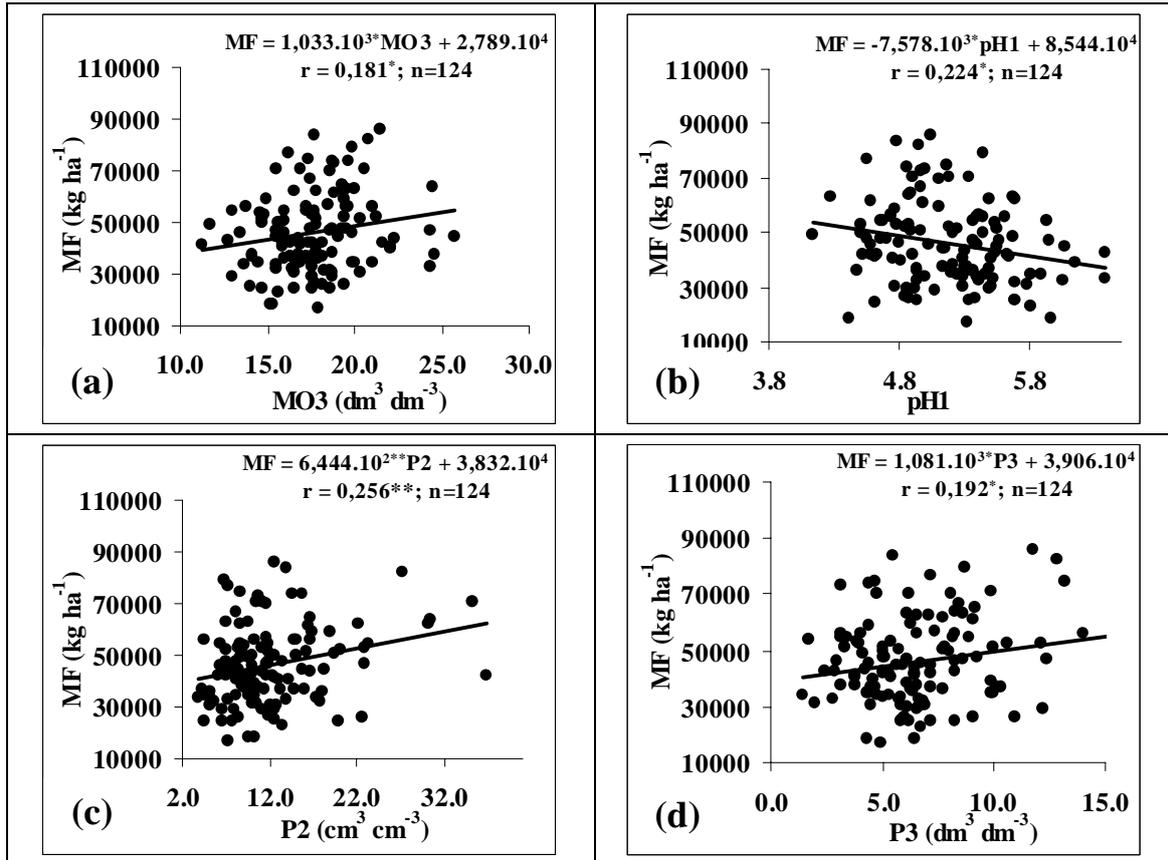


Figura 3: Equações de regressão entre a produtividade da massa fresca (MF) do capim-Marandu com alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

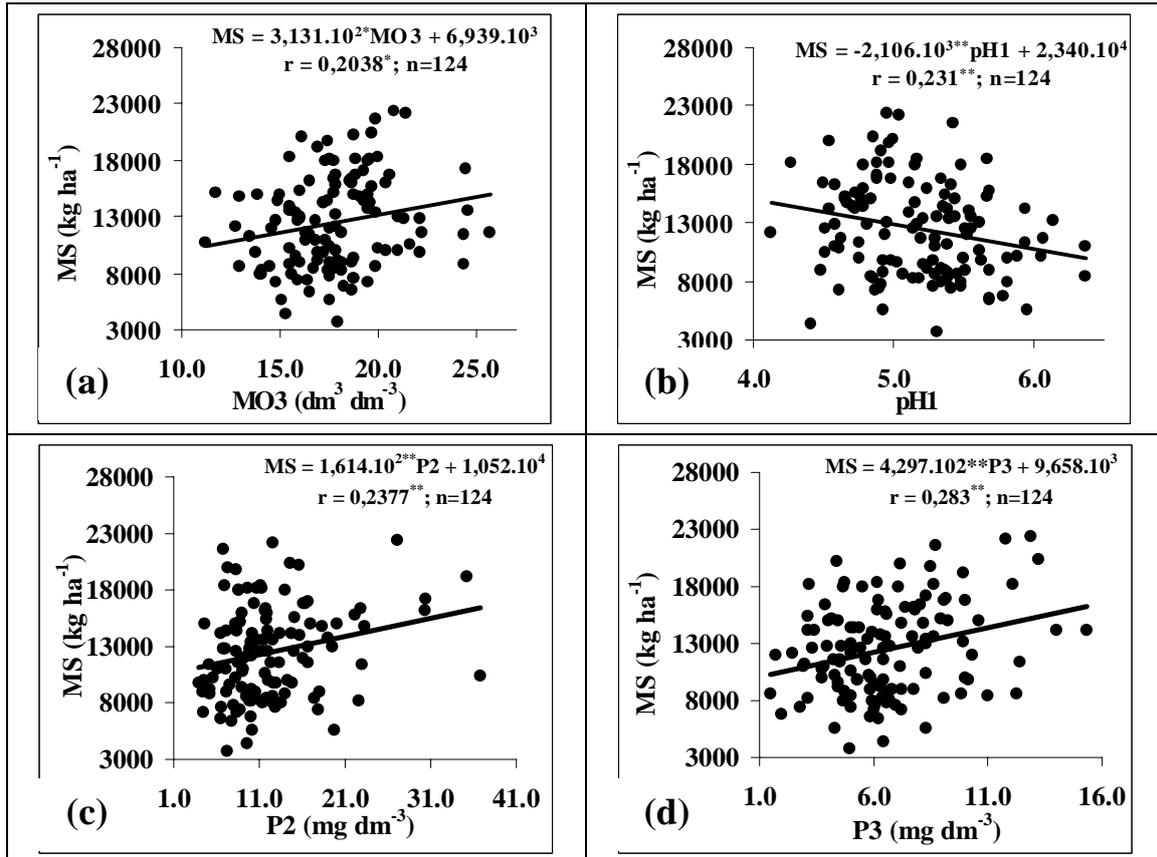


Figura 4: Equações de regressão entre a produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu com alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

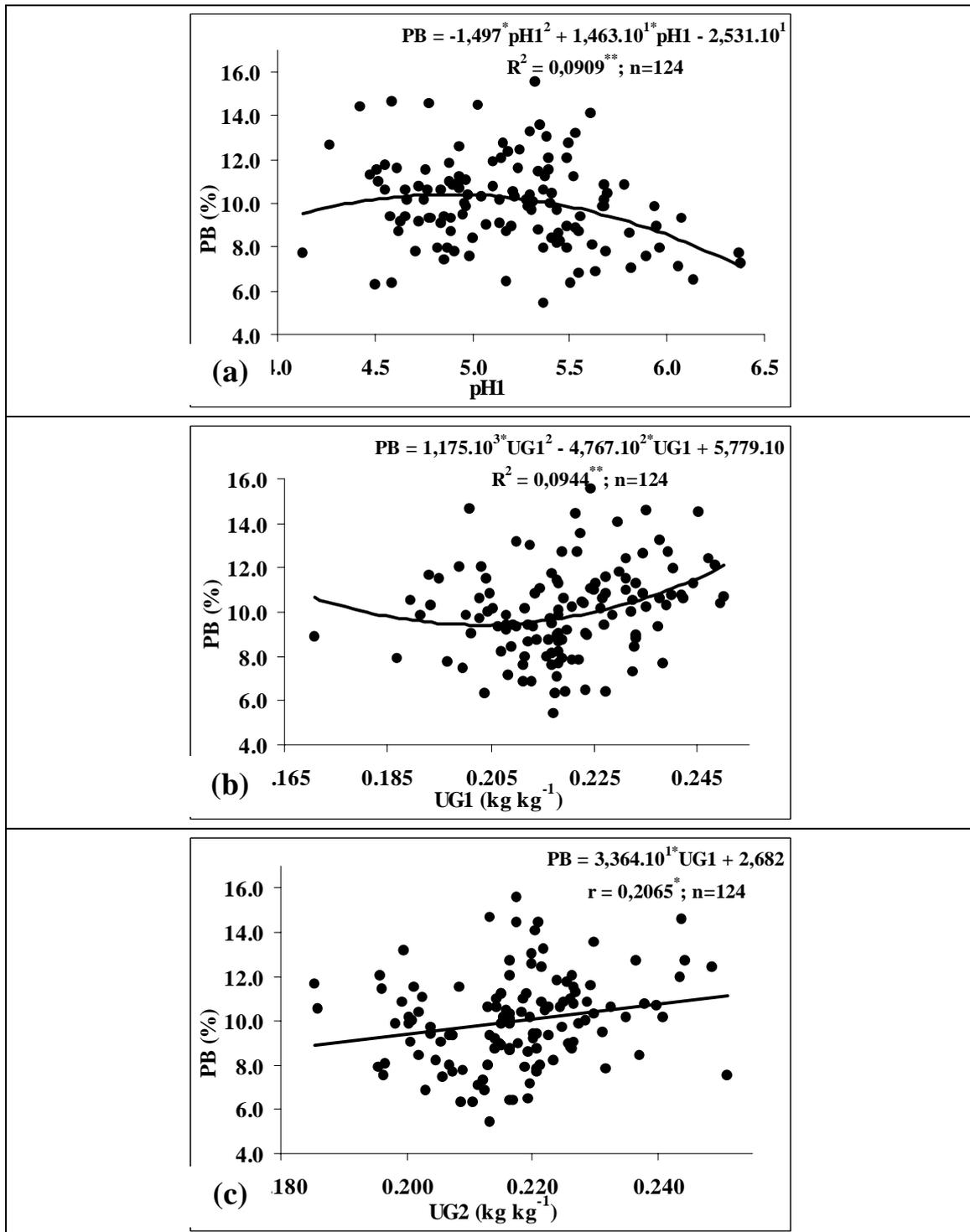


Figura 5: Equações de regressão entre o teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu com alguns atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Para a correlação entre atributos da planta *versus* solo (Quadro 5), os modelos matemáticos $MF=f(DS3)$, $MS=f(UV3)$, $MS=f(P2)$, $MS=f(P3)$ e $MS=f(MO3)$, respectivamente representados nas Figuras 1 (c, d) e 4 (a, c, d), apresentaram relação linear crescente para todos. Entretanto, do ponto de vista agrônômico, o modelo representado por $MS=f(RP3)$ apresentou relação linear decrescente, ou seja, com o aumento da RP3 haverá redução da MS. Assim, quando do ponto de vista da análise de regressão $MS = f(\text{atributo do solo})$, a RP3 apresentou-se como um plausível indicador da qualidade física do solo estudado, uma vez que foi o atributo que apresentou o maior o coeficiente de correlação (-0,301**).

Com relação aos modelos $MF= f(DS3)$, $MF=f(UG2)$, $MF=f(UG3)$, $MF=f(UV3)$, $MF=f(P2)$, $MF=f(P3)$, $MF=f(MO3)$, que são representados pelas Figuras 2 (c, d, e, f) e Figura 3 (a, c, d) apresentaram relação linear crescente entre causa e efeito. Todavia, os modelos $MF=f(RP2)$, $MF=f(RP3)$ e $MF=f(pH1)$, cujas Figuras são 2a, 2b e 3b, apresentaram também relação linear porém decrescente entre causa e efeito.

Para o teor de PB os modelos variaram entre linear, para $PB=f(UG2)$ e quadráticos representados por $PB=f(UG1)$ e $PB=f(pH1)$, cujos coeficientes de correlação foram de 0,207*, 0,094** e 0,091**, respectivamente. Assim pode-se inferir que com o aumento da umidade do solo na camada de 0,10 a 0,20 m, houve aumento do teor de PB do capim-Marandu. Quando derivou as equações de segundo grau significativas, constatou-se como ponto de máximo para o pH1 o valor de 4,89, ou seja, valores de pH superiores a este na camada de zero-0,10 m acarretam em redução do teor de PB. Em contrapartida, o valor de 0,203 kg kg⁻¹ de UG1 é o ponto de mínimo, onde a umidade do solo reduz o teor de PB da forrageira.

4.3 Análise geoestatística dos atributos estudados

4.3.1 Análise dos semivariogramas simples

No Quadro 6 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade de massa fresca e seca da *Brachiaria brizantha* juntamente com o seu teor de proteína bruta e alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Já nas figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 estão apresentados seus

respectivos semivariogramas. Assim, ficou atestado que, com exceção da DP2, DP3, MA3, PTc1, PTc2, PTc3, P1, RP1, RP2, UG1, UG2, UG3, UV3, pH2 e pH3, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial.

No tocante ao desempenho dos semivariogramas (Quadro 6), a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) #P2 (0,979), 2) MF (0,969), 3) UV1 (0,968), 4) PB (0,965), 5) UV2 (0,946), 6) DS1 (0,943), 7) pH1 (0,926), 8) MA1 (0,907), 9) MA2 (0,900), 10) PTd1 (0,898), 11) MS (0,865), 12) MO1 (0,859), 13) RP3 (0,855), 14) DS3 (0,830), 15) #MO3 (0,806), 16) MI1 (0,805), 17) MI2 (0,760), 18) DP1 (0,720), 19) MO2 (0,670), 20) PTd2 (0,606), 21) PTd3 (0,594), 22) P3 (0,528), 23) DS2 (0,391) e 24) MI3 (0,377).

Assim, em relação aos 3 primeiros, que tiveram os mais elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se que para o primeiro (#P2), o valor do r^2 do de 0,979, indicou ser tal atributo o de melhor ajuste semivariográfico, concordando com Guedes Filho, Vieira e Grego (2008), que encontraram forte grau de dependência espacial para P na camada de 0,00-0,20 m. Entretanto, não estão de acordo com o verificado por Machado et al. (2007), Basso et al. (2007), os quais não constataram dependência espacial do teor de P no solo, o que é denominado efeito pepita puro. Em relação ao ADE deste atributo, o alto valor obtido (73,2%) está em consonância ao resultado de Guedes Filho, Vieira e Grego (2008), contudo, o modelo gaussiano ajustado para o #P2 diferiu do modelo esférico obtido pelos referidos autores. Também, o alcance do #P2 do presente (57,7 m) foi menor do que aquele dos citados autores, que foi de 70,0 m.

Para o segundo melhor ajuste (Quadro 6), o valor de r^2 da MF foi de 0,969, entretanto, não há comparação com trabalhos da literatura, devido a escassez de pesquisa relacionando *Brachiaria brizantha* e geoestatística. Assim a MF apresentou um valor moderado de ADE (50,0%), com alcance de 63,1 m e modelo esférico.

Para UV1 (Quadro 6), o valor do r^2 determinado foi de 0,968, que indicou ser tal atributo o terceiro de melhor ajuste semivariográfico, corroborando aos resultados de Rosa Filho (2008), no qual o valor foi de 0,816. Em relação ao ADE, o alto valor constatado (71,8%) diferiu aos de Rosa Filho (2008), no qual foi considerado moderado (66,15%).

Quadro 6: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Parâmetros					Avaliador da dependência espacial	
		Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE (d)	Classe
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>								
MF (kg ha ⁻¹)	esf	1,192.10 ⁸	2,385.10 ⁸	63,1	0,969	4,220.10 ¹⁴	50,0	moderada
MS (kg ha ⁻¹)	esf	8,240.10 ⁶	1,649.10 ⁷	49,4	0,865	7,930.10 ¹²	50,0	moderada
PB (%)	esf	2,005	4,011	41,1	0,965	9,170.10 ⁻²	50,0	moderada
<i>γ(h) simples dos atributos do solo</i>								
DP1 (kg dm ⁻³)	exp	2,680.10 ⁻³	1,806.10 ⁻²	16,5	0,720	9,649.10 ⁻⁶	85,2	alta
DP2 (kg dm ⁻³)	epp	2,597.10 ⁻²	2,597.10 ⁻²	-	-	-	-	-
DP3 (kg dm ⁻³)	epp	2,900.10 ⁻²	2,900.10 ⁻²	-	-	-	-	-
DS1 (kg dm ⁻³)	esf	5,140.10 ⁻³	1,058.10 ⁻²	63,9	0,943	1,583.10 ⁻⁶	51,4	moderada
DS2 (kg dm ⁻³)	esf	1,179.10 ⁻³	2,768.10 ⁻³	14,3	0,391	2,221.10 ⁻⁶	57,4	moderada
DS3 (kg dm ⁻³)	exp	1,878.10 ⁻³	3,766.10 ⁻³	73,5	0,830	3,361.10 ⁻⁷	50,1	moderada
MA1 (m ³ m ⁻³)	esf	7,330.10 ⁻⁴	1,476.10 ⁻⁴	38,1	0,907	3,407.10 ⁻⁸	50,3	moderada
MA2 (m ³ m ⁻³)	esf	1,762.10 ⁻⁴	2,652.10 ⁻⁴	12,5	0,900	3,950.10 ⁻⁹	60,1	moderada
MA3 (m ³ m ⁻³)	epp	2,060.10 ⁻⁴	2,060.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
MI1 (m ³ m ⁻³)	gau	4,200.10 ⁻⁵	3,670.10 ⁻⁴	7,8	0,805	1,277.10 ⁻⁸	88,6	alta
MI2 (m ³ m ⁻³)	esf	0,000	2,020.10 ⁻⁴	11,8	0,760	6,803.10 ⁻⁹	100,0	alta
MI3 (m ³ m ⁻³)	exp	3,300.10 ⁻⁵	2,510.10 ⁻⁴	8,7	0,377	2,930.10 ⁻⁸	88,4	alta
PTd1 (m ³ m ⁻³)	exp	8,500.10 ⁻⁵	8,750.10 ⁻⁴	14,1	0,898	3,011.10 ⁻⁸	91,1	alta
PTd2 (m ³ m ⁻³)	exp	5,500.10 ⁻⁵	4,320.10 ⁻⁴	17,4	0,606	1,245.10 ⁻⁸	87,3	alta
PTd3 (m ³ m ⁻³)	esf	0,000	2,880.10 ⁻⁴	10,9	0,594	2,524.10 ⁻⁸	100,0	alta
PTc1 (m ³ m ⁻³)	epp	2,488.10 ⁻³	2,488.10 ⁻³	-	-	-	-	-
PTc2 (m ³ m ⁻³)	epp	2,311.10 ⁻³	2,311.10 ⁻³	-	-	-	-	-
PTc3 (m ³ m ⁻³)	epp	2,808.10 ⁻³	2,808.10 ⁻³	-	-	-	-	-
P1 (mg dm ⁻³)	epp	6,793.10	6,793.10	-	-	-	-	-
#P2 (mg dm ⁻³) ^(e)	gau	2,350.10	8,755.10	57,7	0,979	1,110.10 ²	73,2	alta
P3 (mg dm ⁻³)	esf	3,300.10 ⁻¹	6,276.10 ²	6,4	0,528	5,38	94,7	alta
RP1 (MPa)	epp	6,155.10 ⁻¹	6,155.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
RP2 (MPa)	epp	1,214	1,214	-	-	-	-	-
RP3 (MPa)	esf	2,164	4,773	39,1	0,855	9,970.10 ⁻¹	54,7	moderada
UG1 (kg kg ⁻¹)	epp	1,030.10 ⁻⁴	1,030.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
UG2 (kg kg ⁻¹)	epp	1,140.10 ⁻⁴	1,140.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
UG3 (kg kg ⁻¹)	epp	2,180.10 ⁻⁴	2,180.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
UV1 (m ³ m ⁻³)	gau	3,610.10 ⁻⁴	1,282.10 ⁻³	52,7	0,968	3,250.10 ⁻⁸	71,8	alta
UV2 (m ³ m ⁻³)	esf	1,850.10 ⁻⁴	3,710.10 ⁻⁴	47,6	0,946	1,983.10 ⁻⁹	50,1	moderada
UV3 (m ³ m ⁻³)	epp	6,210.10 ⁻⁴	6,210.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-
pH1	esf	6,540.10 ⁻²	1,568.10 ⁻¹	25,8	0,926	3,929.10 ⁻⁴	58,3	moderada
pH2	epp	6,527.10 ⁻²	6,527.10 ⁻²	-	-	-	-	-
pH3	epp	3,910.10 ⁻²	3,910.10 ⁻²	-	-	-	-	-
MO1 (g dm ⁻³)	exp	3,260	6,936	40,2	0,859	1,090	53,0	moderada
MO2 (g dm ⁻³)	esf	1,169	4,056	31,2	0,670	2,220	71,2	alta
#MO3 (g dm ⁻³)	esf	3,037	6,075	54,7	0,806	2,250	50,0	moderada

^(a)MF = massa fresca, MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, PTc = porosidade total calculada, P = teor de fósforo, RP = resistência mecânica a penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, pH= pH em CaCl₂ e MO = matéria orgânica; ^(b) esf = esférico, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro, gau = gaussiano, ^(c) SQR = Soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial. ^(e) # valores retrotransformados do resíduo.

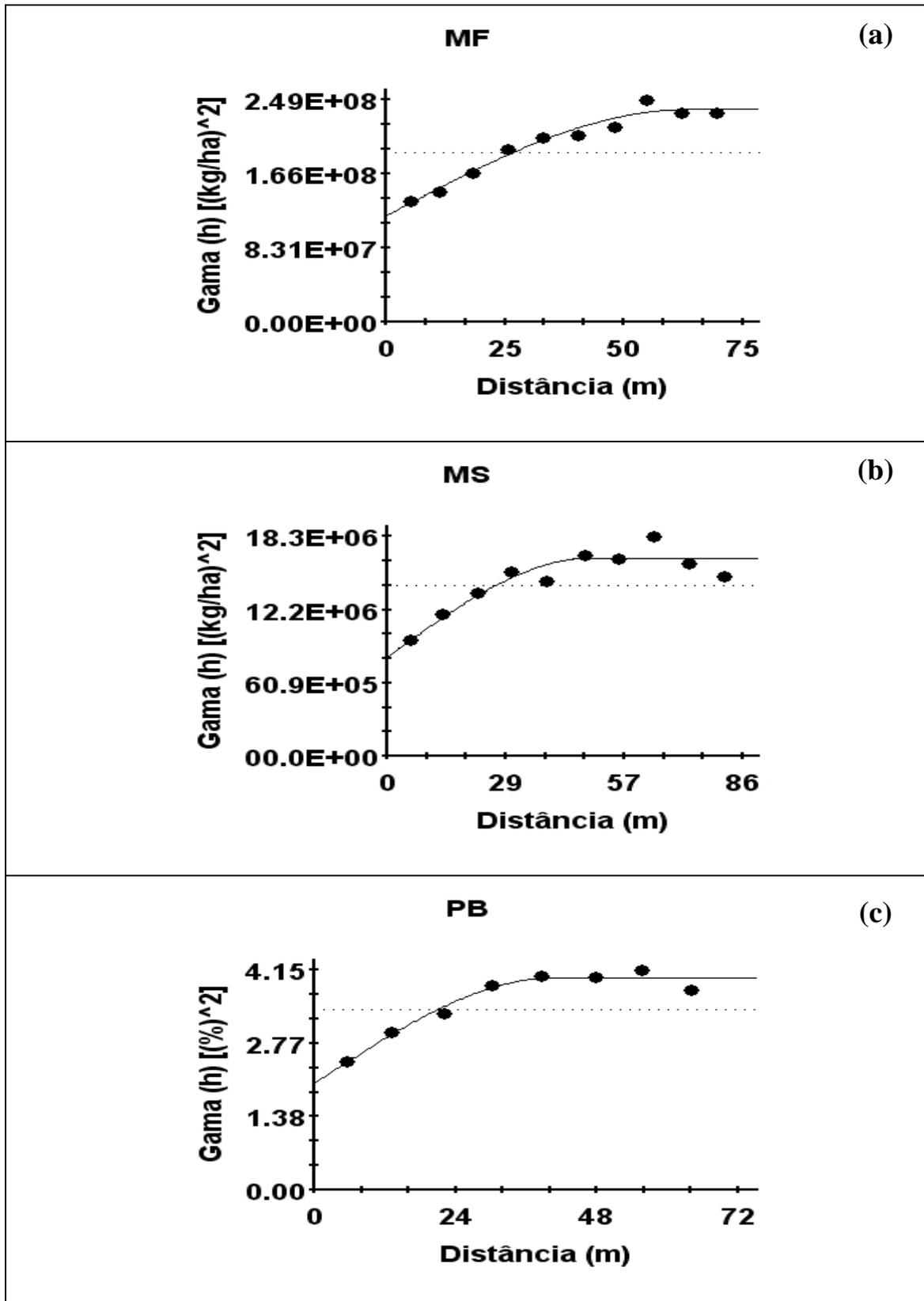


Figura 6: Semivariogramas simples dos atributos massa fresca (MF), massa seca (MS) e teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

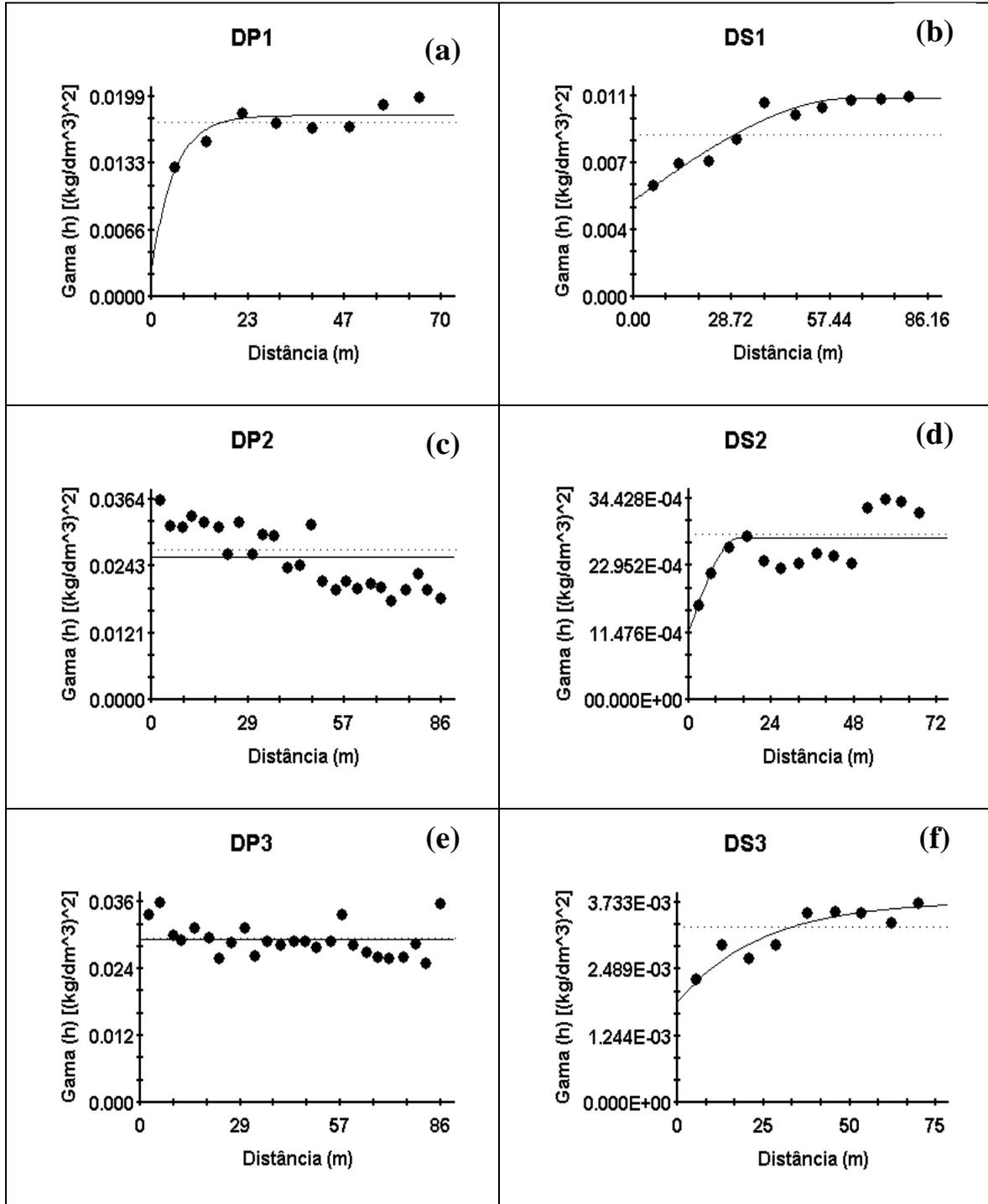


Figura 7: Semivariogramas simples da densidade de partículas (DP1, DP2 e DP3) e da densidade do solo (DS1, DS2 e DS3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

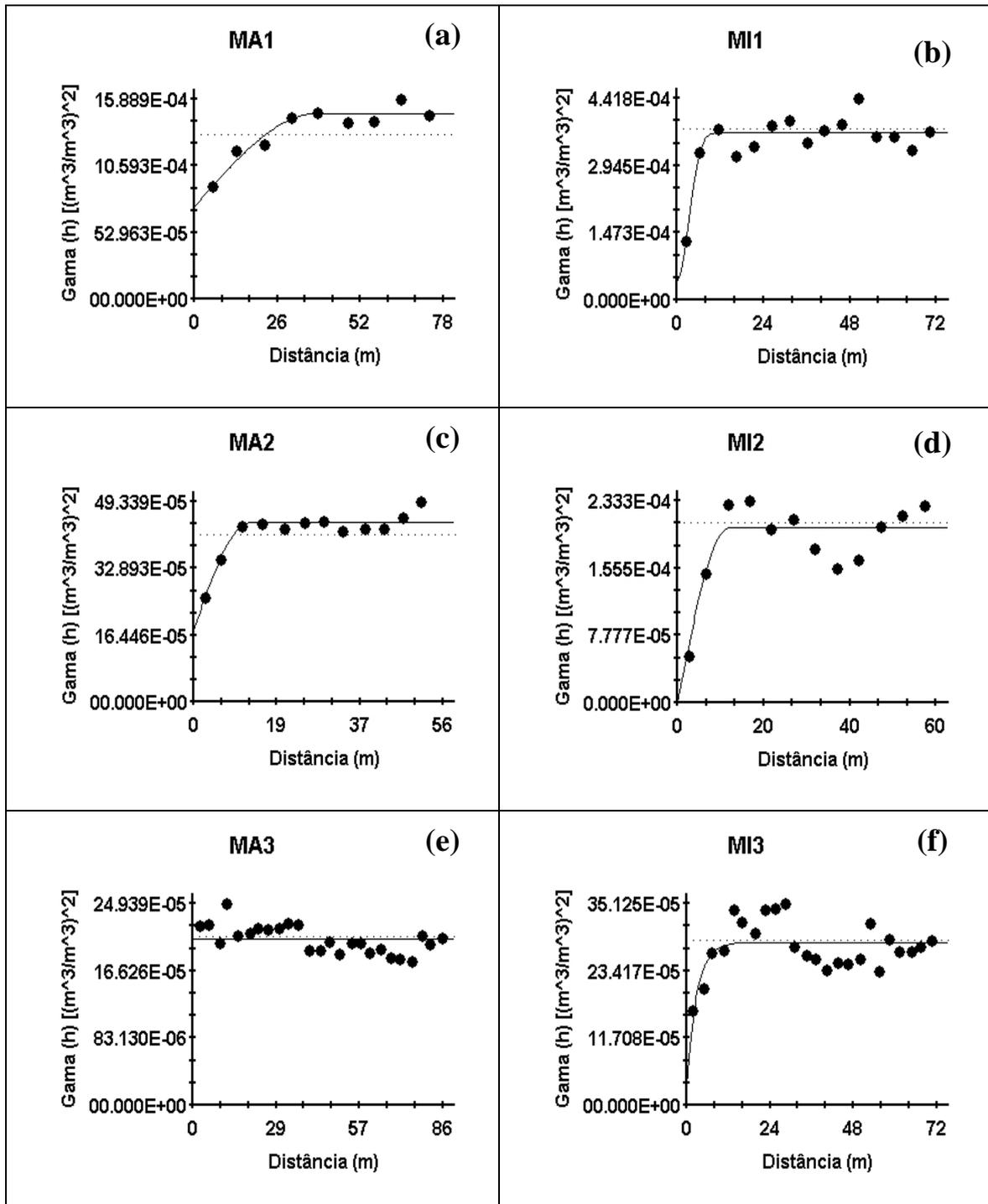


Figura 8: Semivariogramas simples da macroporosidade (MA1, MA2 e MA3) e da microporosidade (MI1, MI2 e MI3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

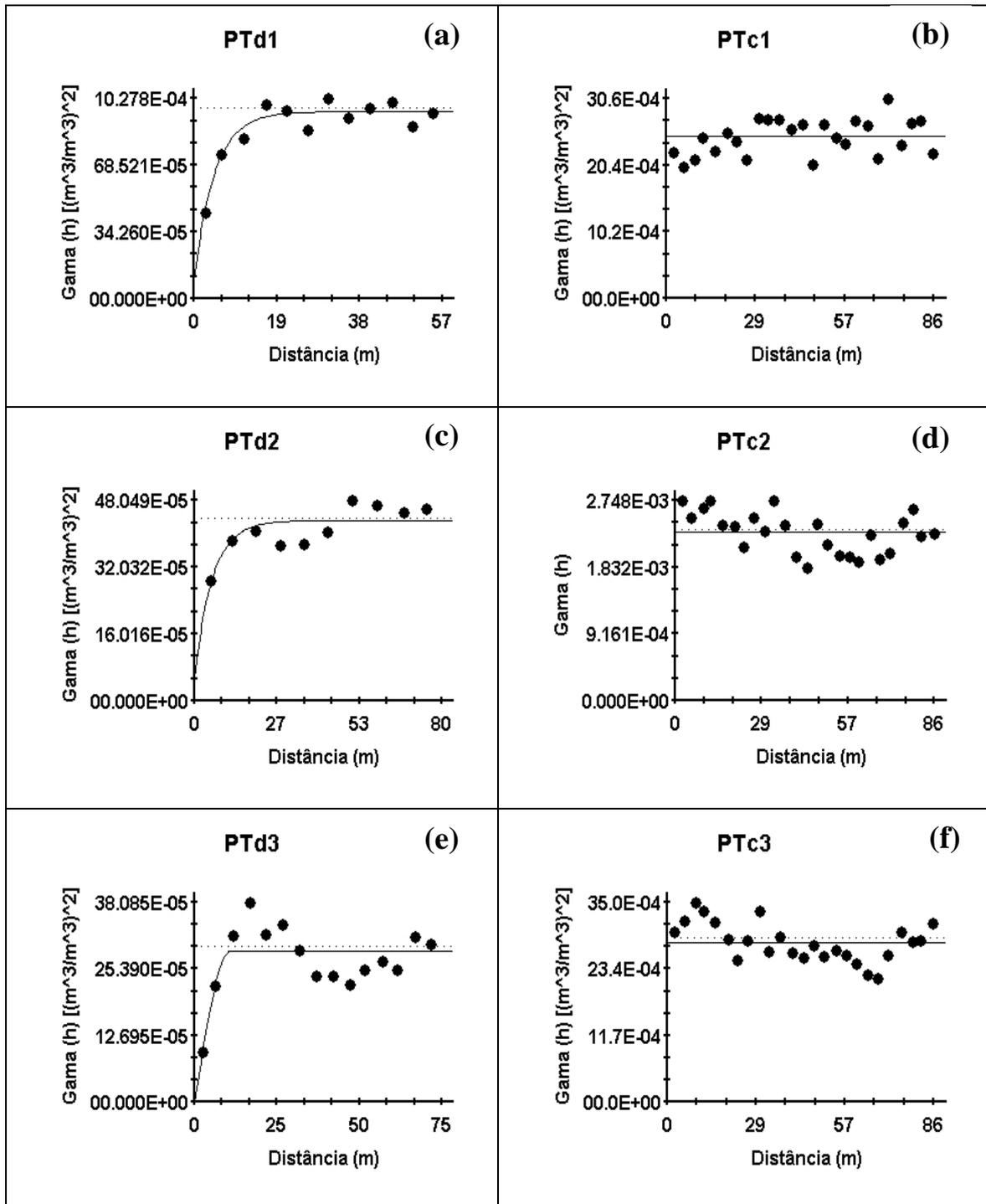


Figura 9: Semivariogramas simples da porosidade total determinada e calculada (PTd1, PTd2, PTd3, PTc1, PTc2 e PTc3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

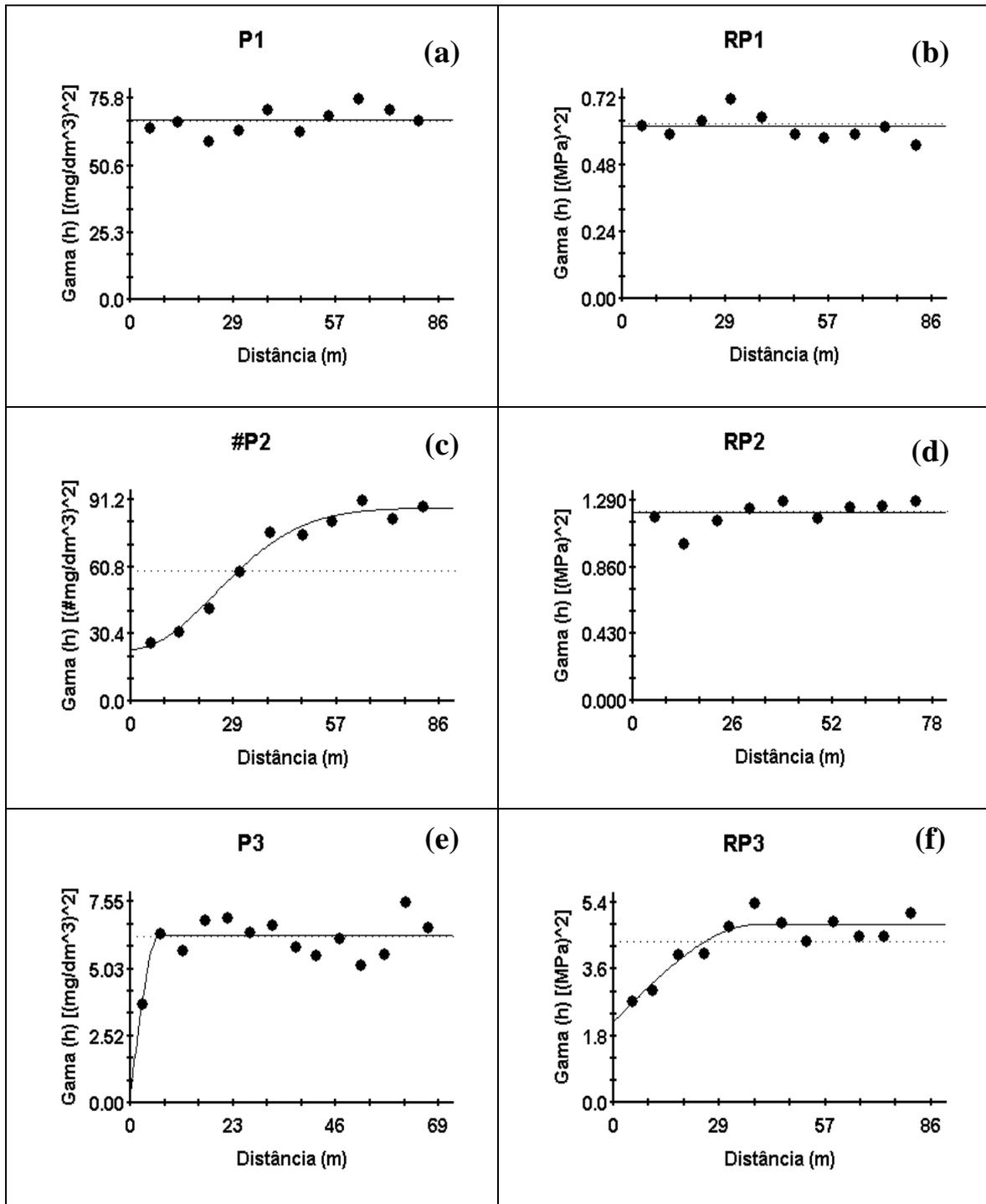


Figura 10: Semivariogramas simples dos teores de fósforo (P1, #P2 e P3) e resistência mecânica à penetração (RP1, RP2 e RP3) num Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).

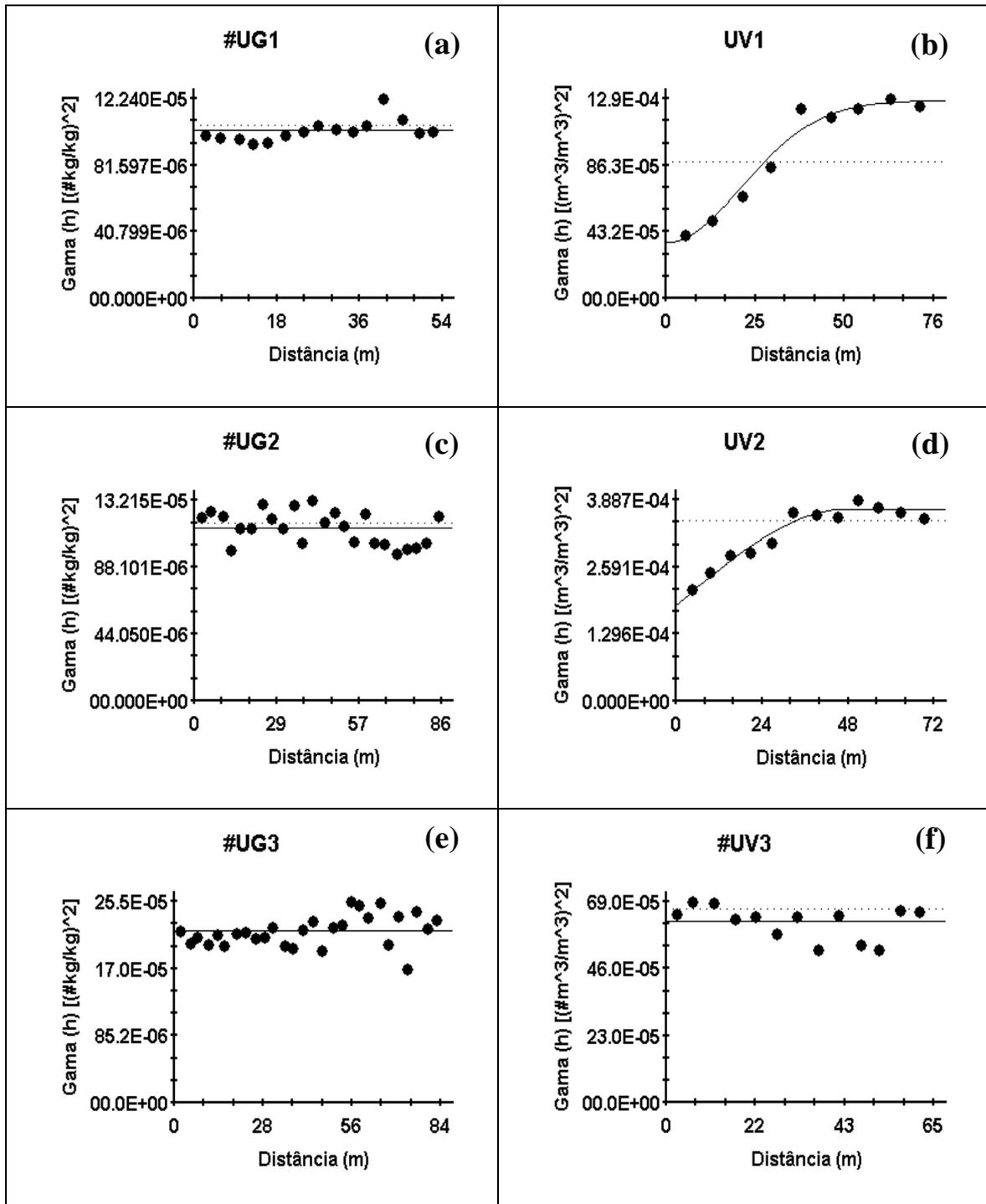


Figura 11: Semivariogramas simples da unidade gravimétrica e volumétrica (#UG1, #UG2, #UG3, UV1, UV2 e #UV3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

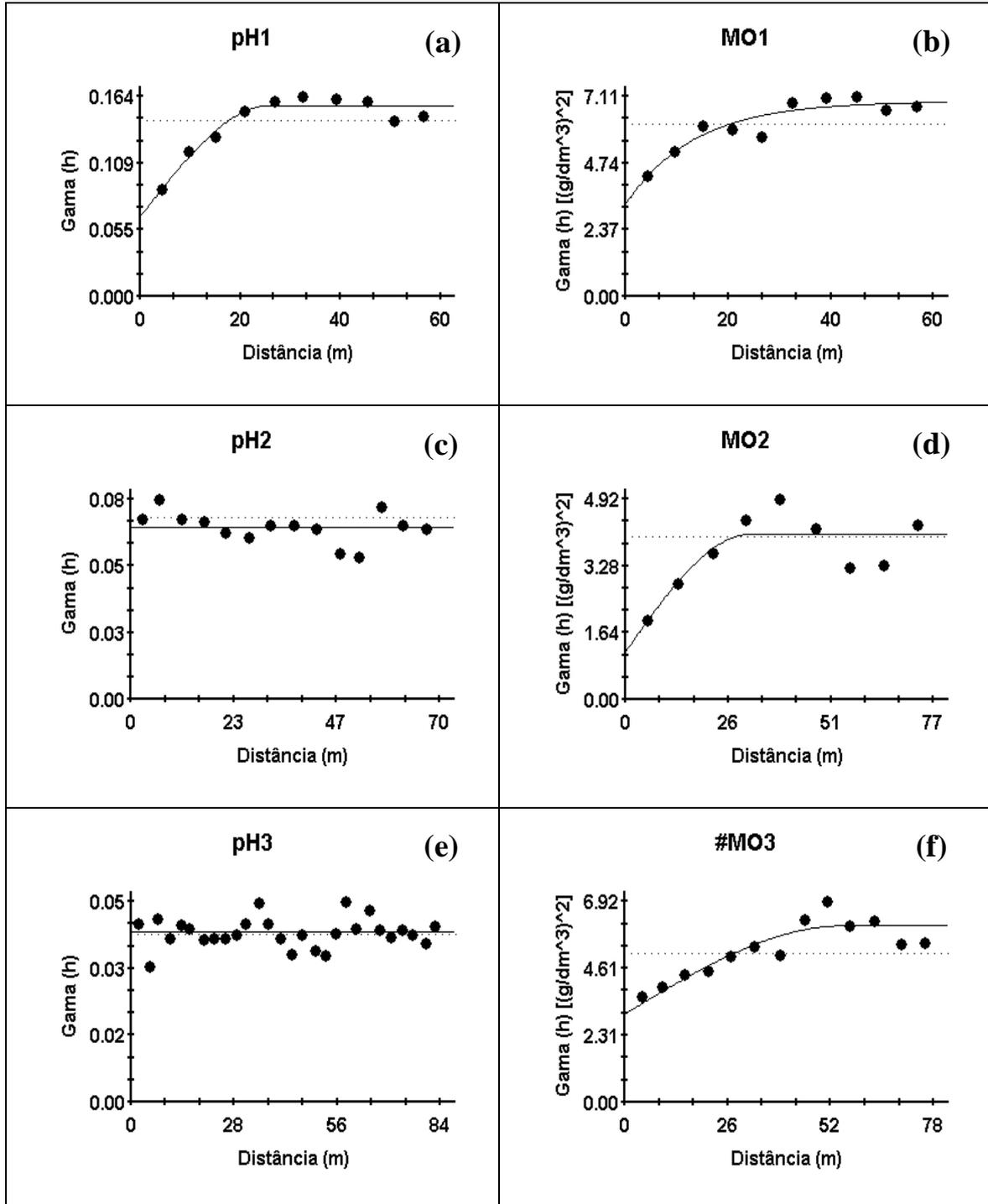


Figura 12: Semivariogramas simples do pH (pH1, pH2 e pH3) e do teor de matéria orgânica (MO1, MO2 e #MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

O modelo gaussiano ajustado para a UV1 diferenciou do modelo exponencial encontrado por Rosa Filho (2008), e também o alcance da UV1 do presente trabalho (52,7 m) foi maior do que os 13,0 m de Rosa Filho (2008), numa malha de 40 x 88 m, semelhante aos 40 x 100 m da malha do presente trabalho.

No Quadro 6, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) DS3 (73,5 m), 2) DS1 (63,9 m), 3) MF (63,1 m), 4) #P2 (57,7 m), 5) #MO3 (54,7 m), 6) UV1 (52,7 m), 7) MS (49,4 m), 8) UV2 (47,6 m), 9) PB (41,1 m), 10) MO1 (40,2 m), 11) RP3 (39,1 m), 12) MA1 (38,1 m), 13) MO2 (31,2 m), 14) pH1 (25,8 m), 15) PTd2 (17,4 m), 16) DP1 (16,5 m), 17) DS2 (14,3 m), 18) PTd1 (14,1 m), 19) MA2 (12,5 m), 20) MI2 (11,8 m), 21) PTd3 (10,9 m), 22) MI3 (8,7 m), 23) MI1 (7,8 m) e 24) P3 (6,4 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 que 6,4 m. Por outro lado, exclusivamente para os atributos da planta, não menores do que 41,1 m.

4.3.1.1 Validação cruzada dos semivariogramas simples

No Quadro 7 estão apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens da produtividade de massa fresca e massa seca, e teor de proteína bruta da *Brachiaria brizantha* e de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). A relação decrescente delas, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) #P2 (0,676), 2) MI2 (0,671), 3) MO2 (0,647), 4) UV1 (0,634), 5) MI3 (0,536), 6) MI1 (0,508), 7) PTd3 (0,476), 8) PTd1 (0,462), 9) RP3 (0,460), 10) UV2 (0,455), 11) DS3 (0,435), 12) DS1 (0,434), 13) pH1 (0,425), 14) PB (0,414), 15) DS2 (0,406), 16) MS (0,386), 17) MF (0,382), 18) MA2 (0,324), 19) MA1 (0,321), 20) DP1 (0,285), 21) PTd2 (0,259), 22) P3 (0,228), 23) #MO3 (0,226) e 24) MO1 (0,187).

Assim, as cinco validações cruzadas com mais altos valores de “ r ” foram estabelecidas para os atributos #P2, MI2, MO2, UV1 e MI3, cujos coeficientes de correlação variaram de 0,676 a 0,536. Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,459 (MO1) e 1,007 (MI2). Portanto houve, no primeiro caso, uma sub-estimativa do valor da MO1, ao passo que, no segundo, foi bem próximo do valor real. Contudo, para a maioria deles, a magnitude do coeficiente b ficou ao redor de 1,0, preconizada como ideal pelo Geostatistics (2004). Assim, pela validação cruzada, onde os melhores ajustes testados devem apresentar o maior coeficiente de determinação (r) e com o valor do coeficiente

adjunto “b” próximo ao valor 1,0, pode-se inferir que #P2 ($r=0,676$ e $b=0,957$) e MI2 ($r=0,671$ e $b=1,007$) foram os atributos do solo de melhor ajuste semivariográfico no presente trabalho.

Quadro 7: Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a + b . VE ^(b)	
		a	b
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos da planta</i>			
MF (kg ha ⁻¹)	0,382	5,442.10 ³	0,879
MS (kg ha ⁻¹)	0,386	1,610.10 ³	0,870
PB (%)	0,414	1,350	0,868
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos do solo</i>			
DP1 (kg dm ⁻³)	0,285	0,990	0,596
DS1 (kg dm ⁻³)	0,434	0,145	0,899
DS2 (kg dm ⁻³)	0,406	0,091	0,940
DS3 (kg dm ⁻³)	0,435	0,081	0,946
MA1 (m ³ m ⁻³)	0,321	0,025	0,738
MA2 (m ³ m ⁻³)	0,324	0,023	0,717
MI1 (m ³ m ⁻³)	0,508	0,010	0,966
MI2 (m ³ m ⁻³)	0,671	0,000	1,007
MI3 (m ³ m ⁻³)	0,536	0,000	1,004
PTd1 (m ³ m ⁻³)	0,462	0,060	0,873
PTd2 (m ³ m ⁻³)	0,259	0,226	0,470
PTd3 (m ³ m ⁻³)	0,476	0,140	0,675
#P2 (mg dm ⁻³)	0,676	0,210	0,957
P3 (mg dm ⁻³)	0,228	3,370	0,490
RP3 (MPa)	0,460	1,070	0,816
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,634	0,020	0,926
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,455	0,050	0,843
pH1	0,425	1,390	0,730
MO1 (g dm ⁻³)	0,187	1,611.10	0,459
MO2 (g dm ⁻³)	0,647	2,570	0,884
#MO3 (g dm ⁻³)	0,226	-0,080	0,622

^(a)MF = massa fresca, MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, PTC = porosidade total calculada, P = teor de fósforo, RP = resistência mecânica a penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, pH = pH em CaCl₂ e MO = matéria orgânica; ^(b) VO = valor observado e VE = valor estimado.

4.3.1.2. Mapas de krigagem

Nas Figuras de 13 a 19 estão apresentados os mapas de krigagem da produtividade de massa fresca e massa seca, e teor de proteína bruta da *Brachiaria brizantha* e dos atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Na Figura 13b, o mapa de krigagem da produtividade de massa seca da braquiária (MS) apresentou os maiores valores (12793-15938 kg ha⁻¹) traçando uma diagonal no mapa no sentido noroeste-sudeste, abrangendo o centro da região nordeste. Por outro lado, nas demais regiões, tal produtividade variou entre 8600 e 11745 kg ha⁻¹.

Analisando-se as figuras 13b (MS) e 13c (PB), fica evidente a semelhança espacial inversa entre ambas, uma vez que onde ocorreu mais alta produtividade da massa seca (12793-15938 kg ha⁻¹), houve redução do teor de PB, com valores entre 7,86 a 9,41%, sendo o inverso verdadeiro.

Em relação aos atributos do solo e com respeito à MS (Fig. 13b), foi observada elevada semelhança direta com o mapa de krigagem da £P2 (Fig. 17a). Assim, nos sítios onde o £P2 foi maior (12,0 a 16,8 mg dm⁻³), a MS também o foi (12793 a 15938 kg ha⁻¹), sendo o inverso também verdadeiro. Tal comportamento permite inferir que a mais alta disponibilidade de P na camada de 0,10-0,20 m proporcionou aumento da produtividade de massa seca da *Brachiaria brizantha*. Em virtude desses resultados, ficou atestado o papel fundamental do aumento dos teores de fósforo no solo sobre o desenvolvimento e conseqüente aumento da produtividade de pastagens em implantação de *Brachiaria brizantha*.

Em relação ao atributo RP3 (Fig.17c), foi notada inversa e elevada semelhança espacial com a MS (Fig. 13b). Assim, nos sítios onde a RP3 foi menor (entre 4,060 e 5,748 MPa) , na parte superior do mapa abrangendo desde a região noroeste até a região nordeste), a MS apresentou os maiores valores (12793 a 15938 kg ha⁻¹). Naqueles onde a RP3 foi maior, (entre 6,310 e 7,998 MPa, na parte inferior do mapa da região sudoeste até a região sudeste), a MS variou entre 8600 a 11745 kg ha⁻¹. Tal comportamento atestou que o aumento da resistência mecânica à penetração (aumento de compactação do solo), mesmo numa camada de 0,20-0,30 m, pode prejudicar o crescimento radicular da *Brachiaria brizantha*, resultando em menor produtividade de MS.

O comportamento inverso entre as variáveis de planta e solo está de acordo com o observado por Carvalho et al. (2006), que trabalhando com a cultura do feijão, encontrou valores entre 1,000 e 3,929 MPa nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, sendo a produtividade de grãos entre 1102 e 2153 kg ha⁻¹, inversamente à esses valores de resistência mecânica à penetração.

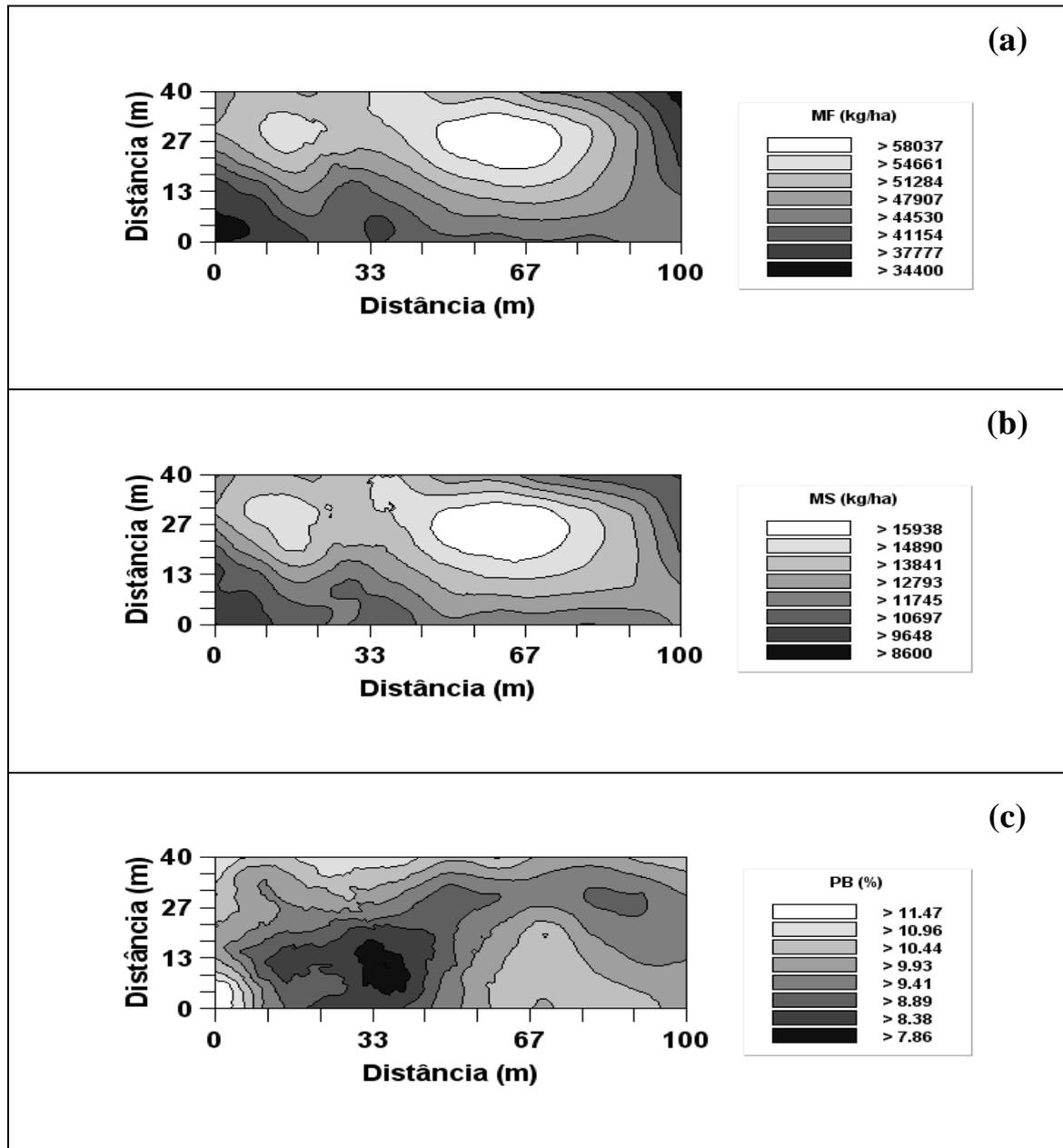


Figura 13: Mapas de krigagem da produtividade de massa fresca (MF), massa seca (MS) e teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

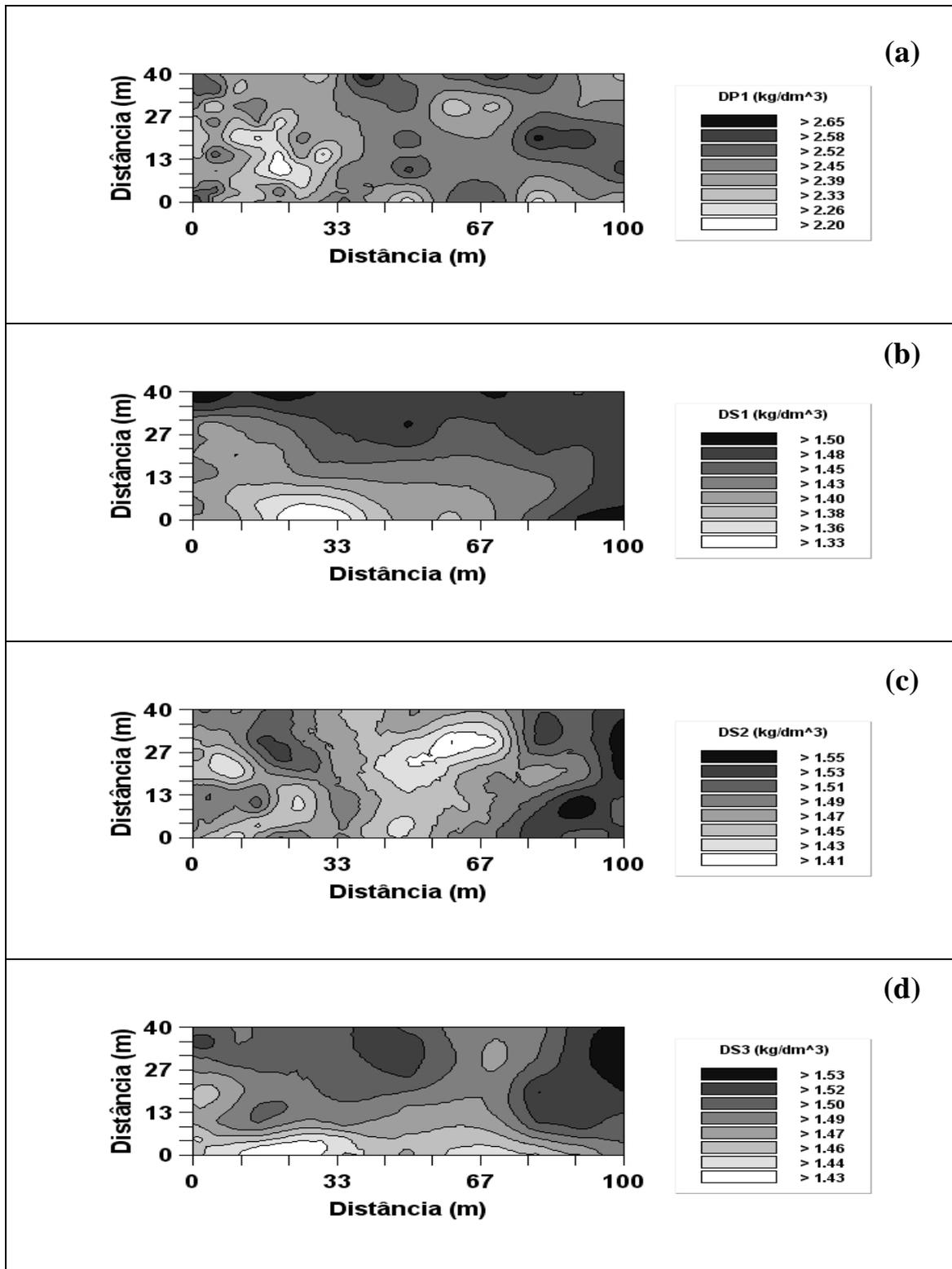


Figura 14: Mapas de krigagem da densidade de partículas (DP1) e da densidade do solo (DS1, DS2 e DS3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

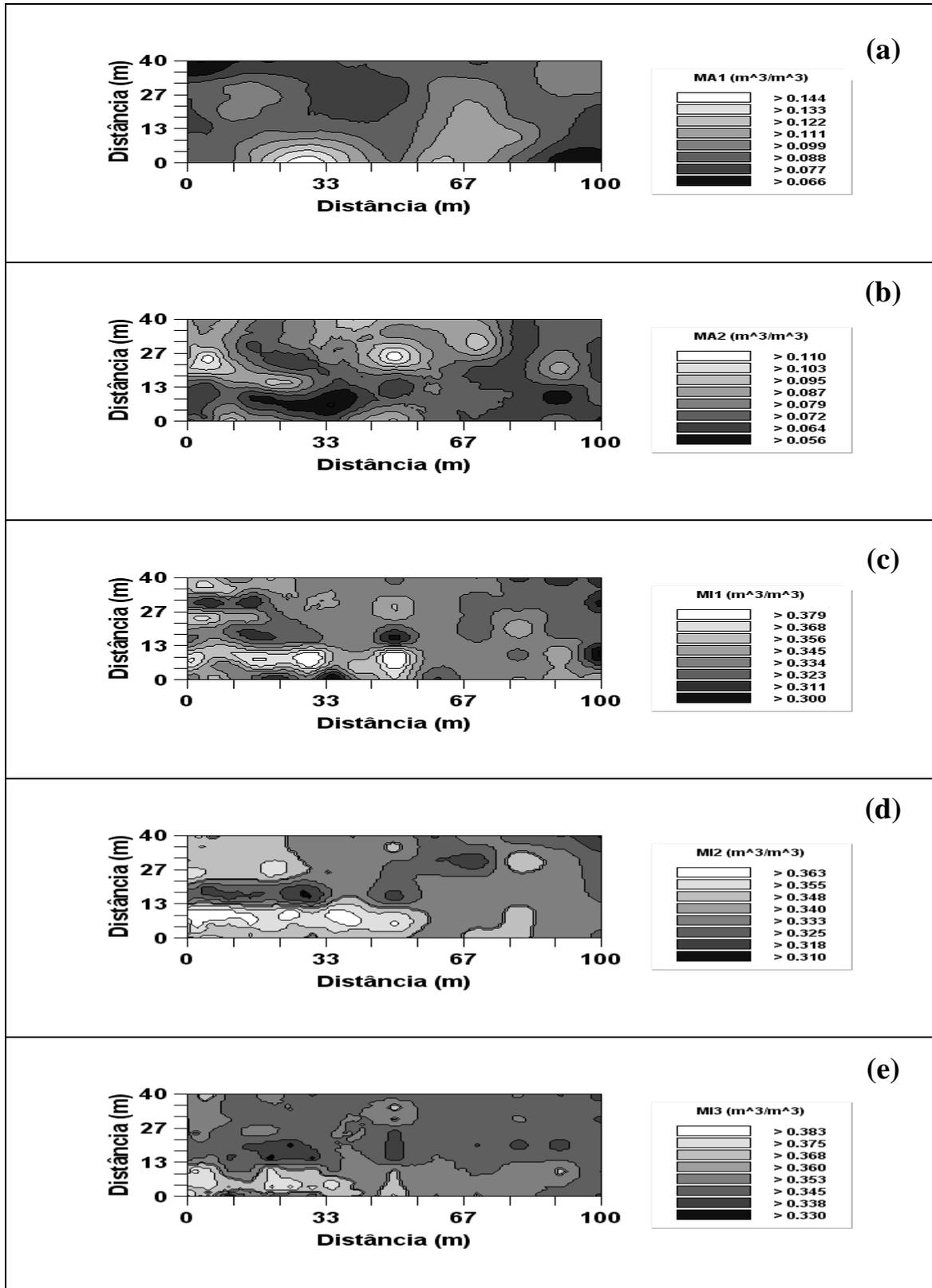


Figura 15: Mapas de krigagem da macroporosidade (MA1 e MA2) e da microporosidade (MI1, MI2 e MI3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

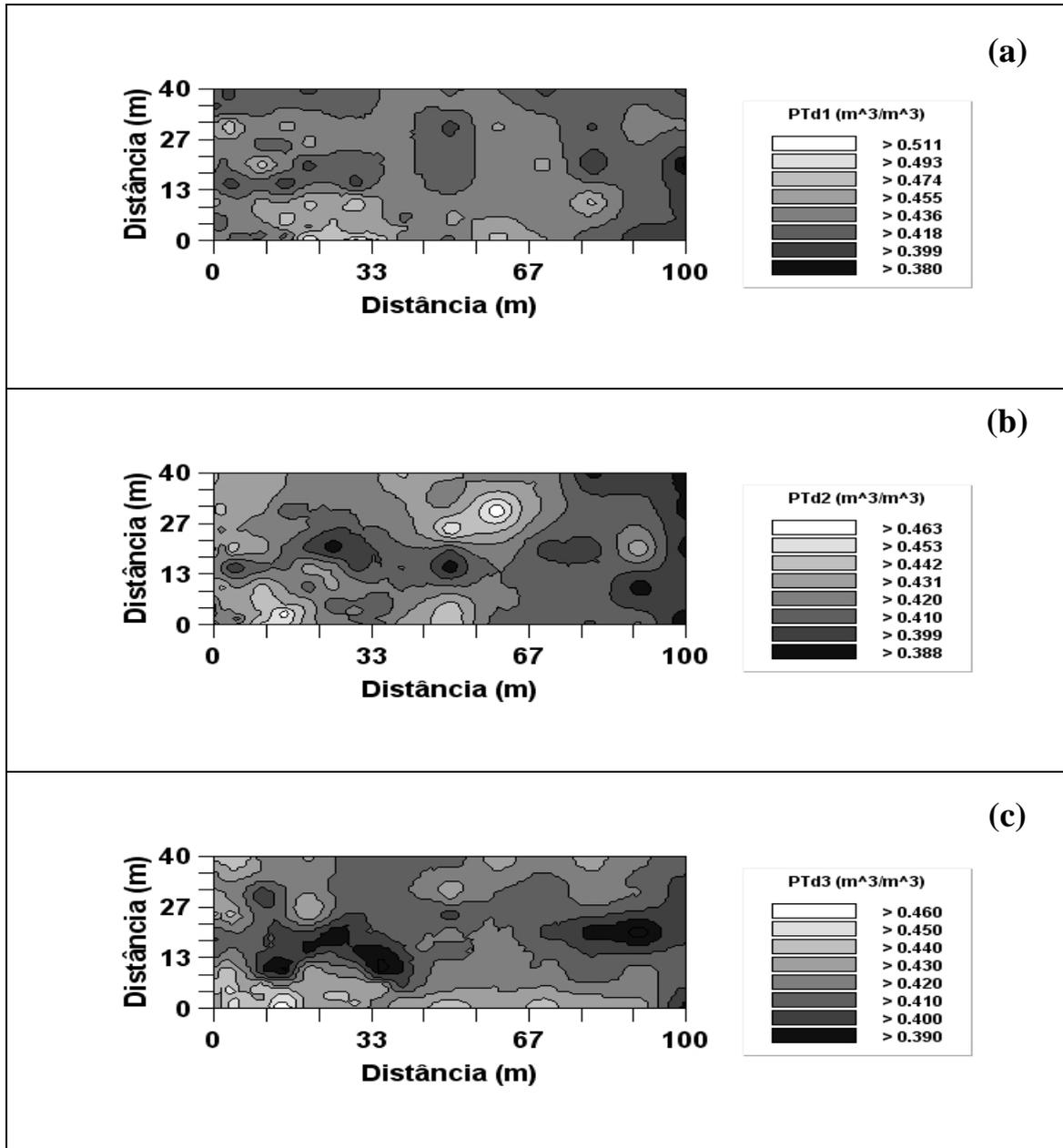


Figura 16: Mapas de krigagem dos da porosidade total determinada (PTd1, PTd2 e PTd3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

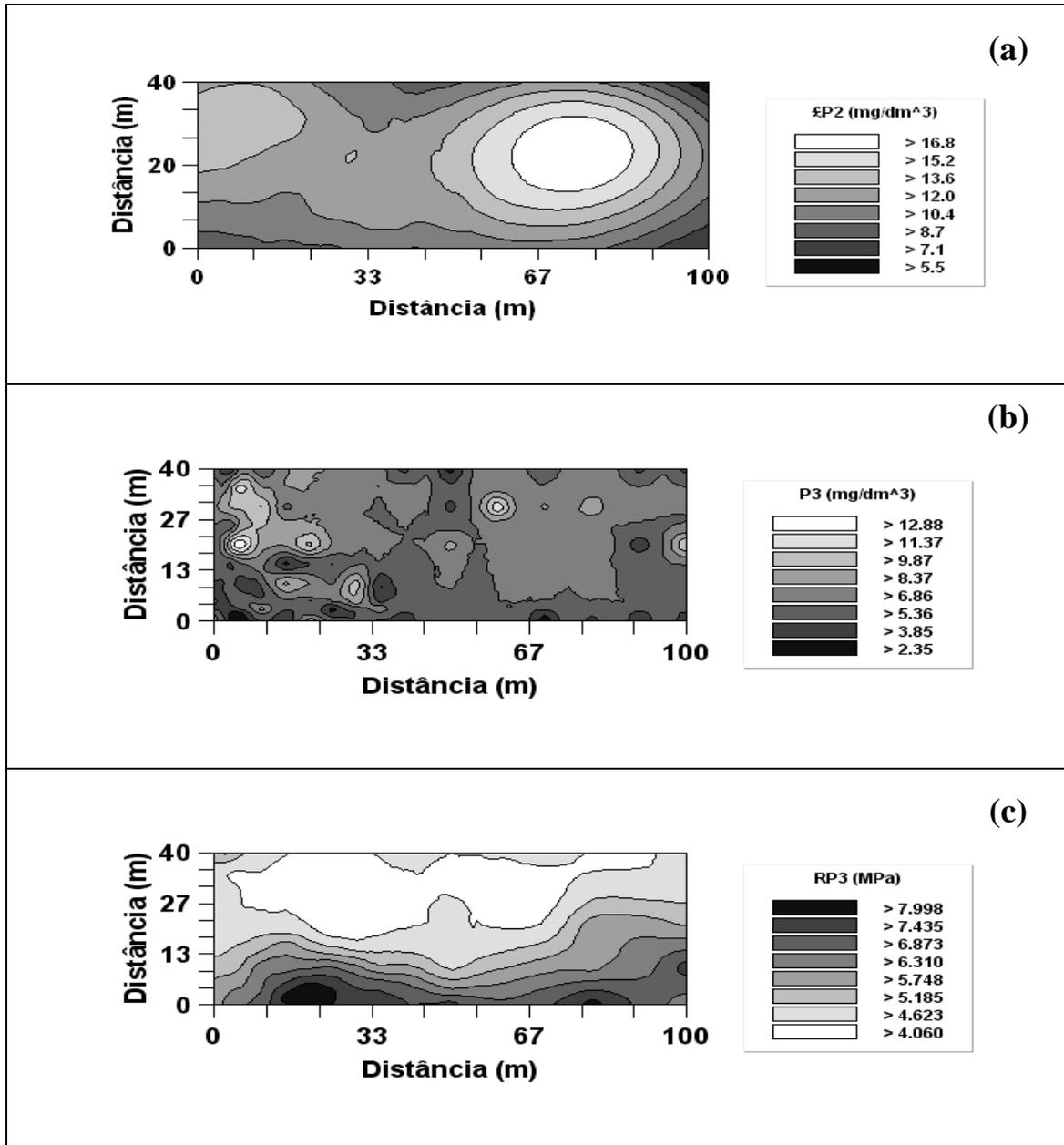


Figura 17: Mapas de krigagem do teor de fósforo ($\Sigma P2$ e $P3$) e da resistência mecânica à penetração ($RP3$) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

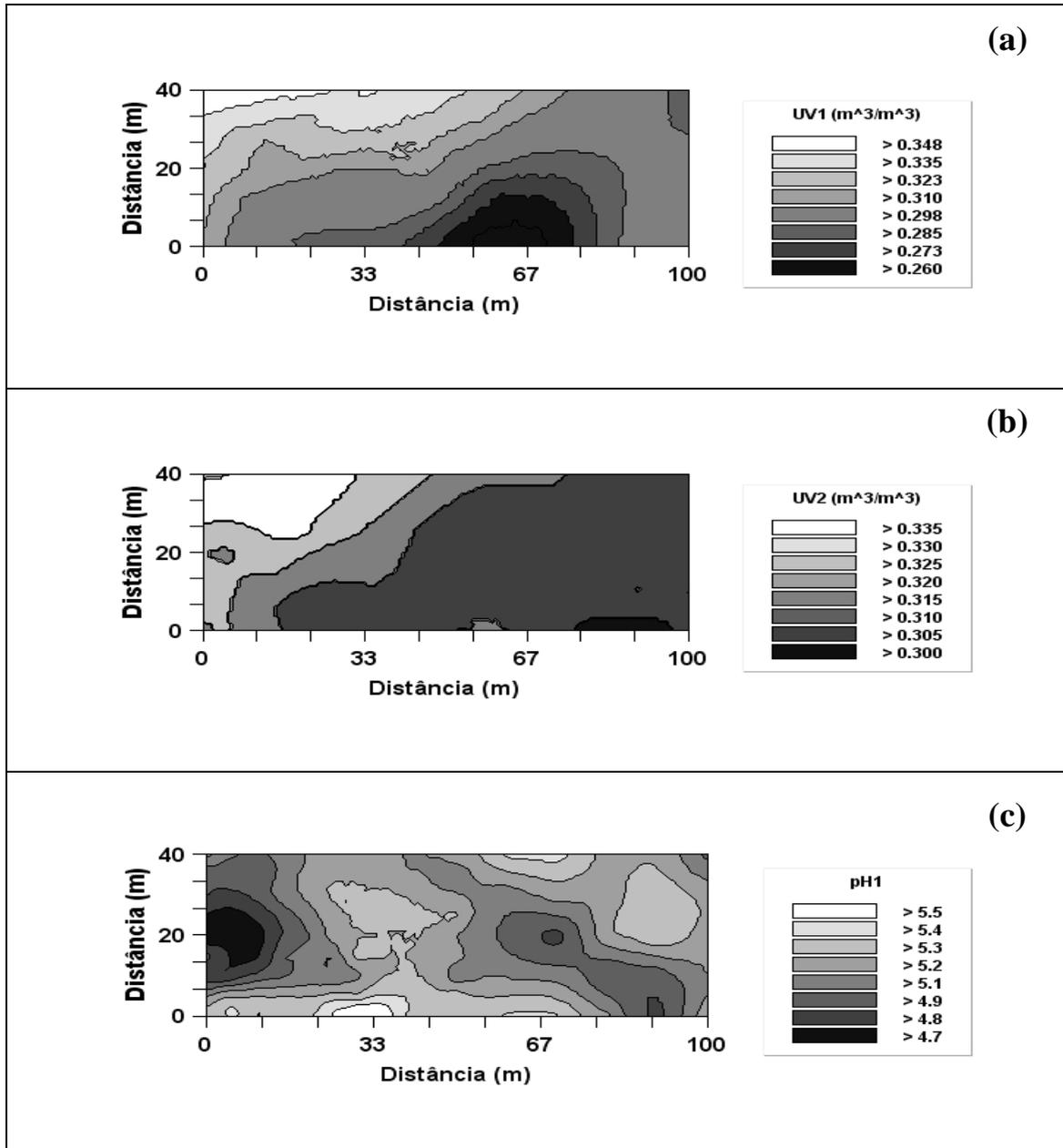


Figura 18: Mapas de krigagem da umidade volumétrica (UV1, UV2) e do pH1 num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

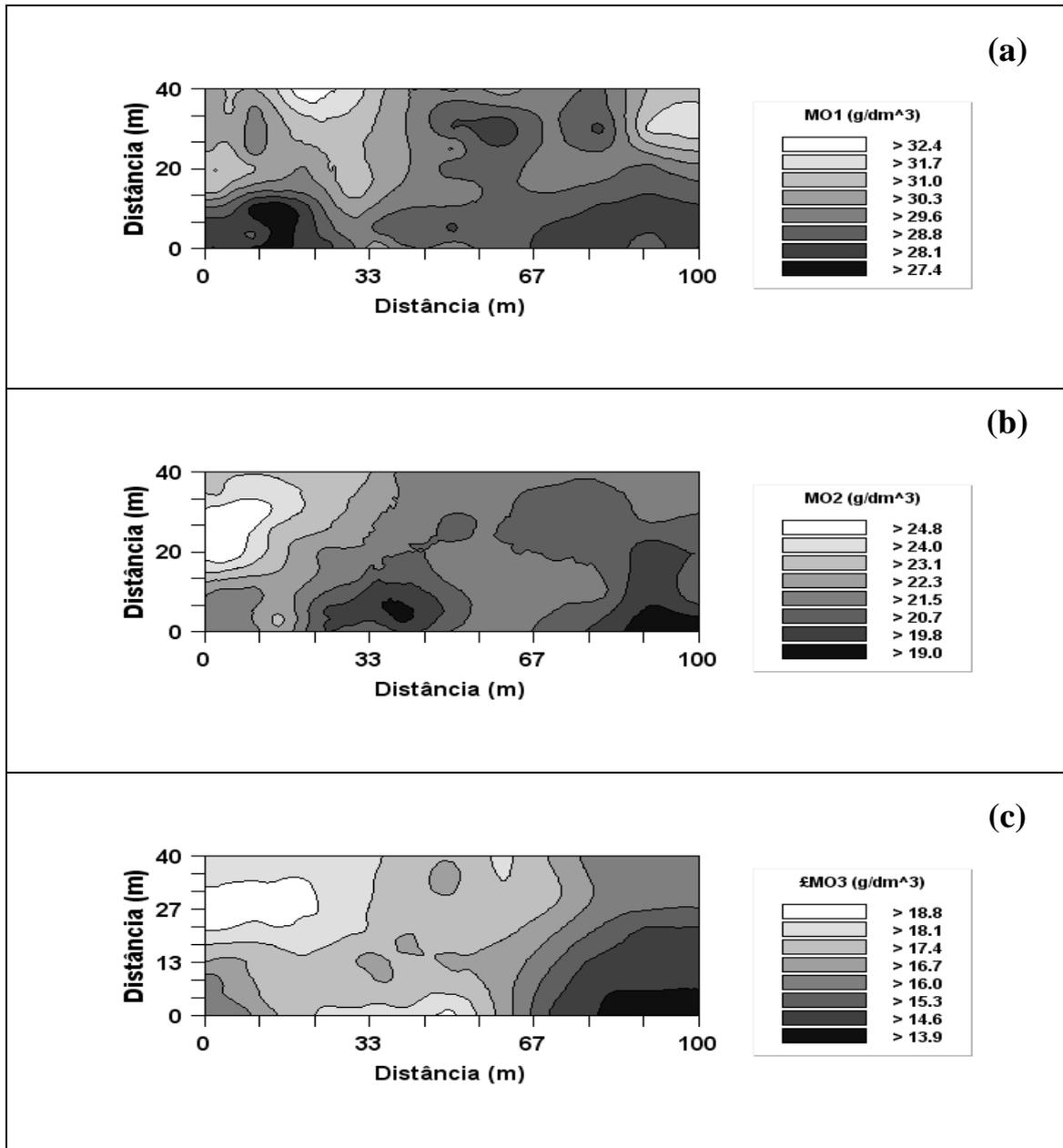


Figura 19: Mapas de krigagem do teor de matéria orgânica (MO1, MO2 e £MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem (planta versus solo)

No Quadro 8 estão apresentadas as co-krigagens, somente aquelas entre planta e o solo. No Quadro 8 também estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas cruzados, ajustados entre a produtividade de massa seca e o teor de proteína bruta da *Brachiaria brizantha* com alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Nas figuras 20 a 23 são mostrados os semivariogramas cruzados e os mapas de co-krigagem entre os atributos da planta versus solo. Em relação ao desempenho dos semivariogramas cruzados, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) $MS=f(DS3)$, $r^2 = 0,976$; 2) $MS=f(DS2)$, $r^2 = 0,973$; 3) $MS=f(P3)$, $r^2 = 0,931$; 4) $MS=f(PTd3)$, $r^2 = 0,842$; 5) $MS=f(MI2)$, $r^2 = 0,795$; 6) $PB=f(\#MO3)$, $r^2 = 0,760$ e 7) $MS=f(RP3)$, $r^2 = 0,730$. A avaliação da dependência espacial (ADE), ficou entre 87,4%, alta para $MS=f(DS3)$, e 100,0%, também alta para a $MS=f(P3)$.

Do ponto de vista edafológico, o maior interesse do Quadro 8 residiu nas co-krigagens efetuadas entre a MS e PB com os atributos do solo (Figuras 20, 21, 22 e 23). As melhores delas e diretas foram estabelecidas pelos atributos $MS=f(DS3)$ (Figura 20 a,b), $MS=f(MA2)$ (Figura 20 c,d), $MS=f(P3)$ (Figura 22 a,b), enquanto que as inversas pelos atributos $MS=f(MI2)$ (Figura 21a,b) e $MS=f(RP3)$ (Fig. 22c,d). Assim, pelas validações cruzadas referentes às co-krigagens (Quadro 9), onde os melhores ajustes testados devem apresentar o maior coeficiente de determinação (r) e com o valor do coeficiente adjunto “b” próximo ao valor 1,0, podendo-se então inferir que $MS=f(P3)$ ($r=0,390$ e $b=0,535$) e $MS=f(RP3)$ ($r=0,335$ e $b=0,470$) foram os atributos de melhor ajuste semivariográfico.

Com relação ao ajuste $MS=f(P3)$ ficou evidenciado (Quadro 8) que 93,1% da variabilidade espacial da produtividade de massa seca da *Brachiaria brizantha* puderam ser explicados pela variabilidade espacial do P3. Também neste caso a partir dos resultados deste atributo do solo podem-se localizar as zonas de manejo de adubação fosfatada para a pastagem que foi estabelecida na área experimental. Assim, pode-se constatar que onde ocorreram os maiores valores de P3 (Figura 17b) foram mapeados os maiores valores de MS (Figuras 13b e 22b). Em contrapartida, nos menores valores da P3, constataram-se os menores valores da MS. Sendo assim, podem ser recomendadas práticas de adubação fosfatada às zonas nas quais a P3 apresentou seus menores valores, visando-se elevar a respectiva

produtividade de MS do local. Portanto, do ponto de vista espacial, o teor de fósforo, avaliado na camada 0,20-0,30 m (P3), apresentou-se como um satisfatório indicador da qualidade química do solo estudado, quando destinado à pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

Quadro 8: Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para alguns atributos do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Parâmetros					Avaliador da dependência espacial	
		Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE (d)	Classe
<i>γ(h) cruzados entre MS e atributos do solo</i>								
MS=f(DS2)	gau	-3,00.10 ⁻¹	-9,16.10	76,0	0,973	2,18.10 ²	99,7	alta
MS=f(DS3)	gau	1,17.10	9,26.10	48,3	0,976	1,54.10 ²	87,4	alta
MS=f(MA2)	esf	1,00.10 ⁻²	1,67.10	33,1	0,470	2,17.10 ²	99,9	alta
MS=f(MI2)	esf	-1,00. 10 ⁻²	-1,54. 10	57,6	0,795	6,09.10	99,9	alta
MS=f(MI3)	gau	-1,00. 10 ⁻²	-1,59.10	26,8	0,872	6,64.10	99,9	alta
MS=f(PTd2)	gau	7,48	2,10.10	59,2	0,573	1,26.10 ²	64,4	moderada
MS=f(PTd3)	gau	-1,00.10 ⁻²	-1,62.10	19,9	0,842	4,36.10	99,9	alta
MS=f(P3)	gau	1,00	2,68.10 ³	19,9	0,931	5,33.10 ⁵	100,0	alta
MS=f(RP3)	gau	-5,10.10	-2,36.10 ³	34,5	0,730	1,87.10 ⁶	97,8	alta
MS=f(UV2)	exp	1,00.10 ²	1,35.10	18,6	0,341	1,33.10 ²	99,9	alta
MS=f(pH1)	esf	-1,01.10 ²	-2,82.10 ²	29,9	0,246	4,97.10 ⁴	64,0	moderada
MS=f(MO2)	gau	1,00	1,63. 10 ³	27,2	0,564	3,68. 10 ⁶	99,9	alta
MS=f(#MO3)	gau	1,00	2,09.10 ³	19,2	0,883	1,22. 10 ⁶	100,0	alta
<i>γ(h) cruzados entre PB e atributos do solo</i>								
PB=f(DP1)	gau	1,00.10 ⁻⁴	4,40.10 ⁻²	53,0	0,748	1,86.10 ⁻³	99,8	alta
PB=f(DS1)	gau	1,00.10 ⁻⁴	3,53.10 ⁻²	53,9	0,828	1,97.10 ⁻³	99,7	alta
PB=f(DS2)	gau	1,00.10 ⁻⁵	2,57.10 ⁻³	64,6	0,779	3,36.10 ⁻⁴	100,0	alta
PB=f(MA1)	gau	-1,00.10 ⁻⁵	-1,09.10 ⁻²	31,5	0,513	1,66.10 ⁻⁴	99,9	alta
PB=f(PTd1)	gau	-1,00.10 ⁻⁵	-8,32.10 ⁻³	47,5	0,775	1,25.10 ⁻⁴	99,9	alta
PB=f(PTd3)	esf	2,20.10 ⁻⁴	8,74.10 ⁻³	12,9	0,125	1,23.10 ⁻⁴	97,5	alta
PB=f(UV1)	gau	1,00.10 ⁻⁵	1,71.10 ⁻²	43,0	0,710	2,35.10 ⁻⁴	99,9	alta
PB=f(UV2)	gau	1,00.10 ⁻⁵	1,05.10 ⁻²	39,5	0,802	5,41.10 ⁻⁵	99,9	alta
PB=f(pH1)	gau	-1,00.10 ⁻⁴	-1,10.10 ⁻¹	33,8	0,436	2,26.10 ⁻²	99,9	alta
PB=f(#MO3)	gau	-1,00.10 ⁻³	-7,31.10 ⁻¹	19,9	0,760	1,15.10 ⁻¹	99,9	alta

^(a) MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, P = teor de fósforo, RP = resistência mecânica a penetração, UV = umidade

volumétrica, pH = pH em CaCl_2 e MO = matéria orgânica; ^(b) esf = esférico, exp = exponencial, gau = gaussiano, ^(c) SQR = Soma dos quadrados dos resíduos; (d) ADE = avaliador da dependência espacial.

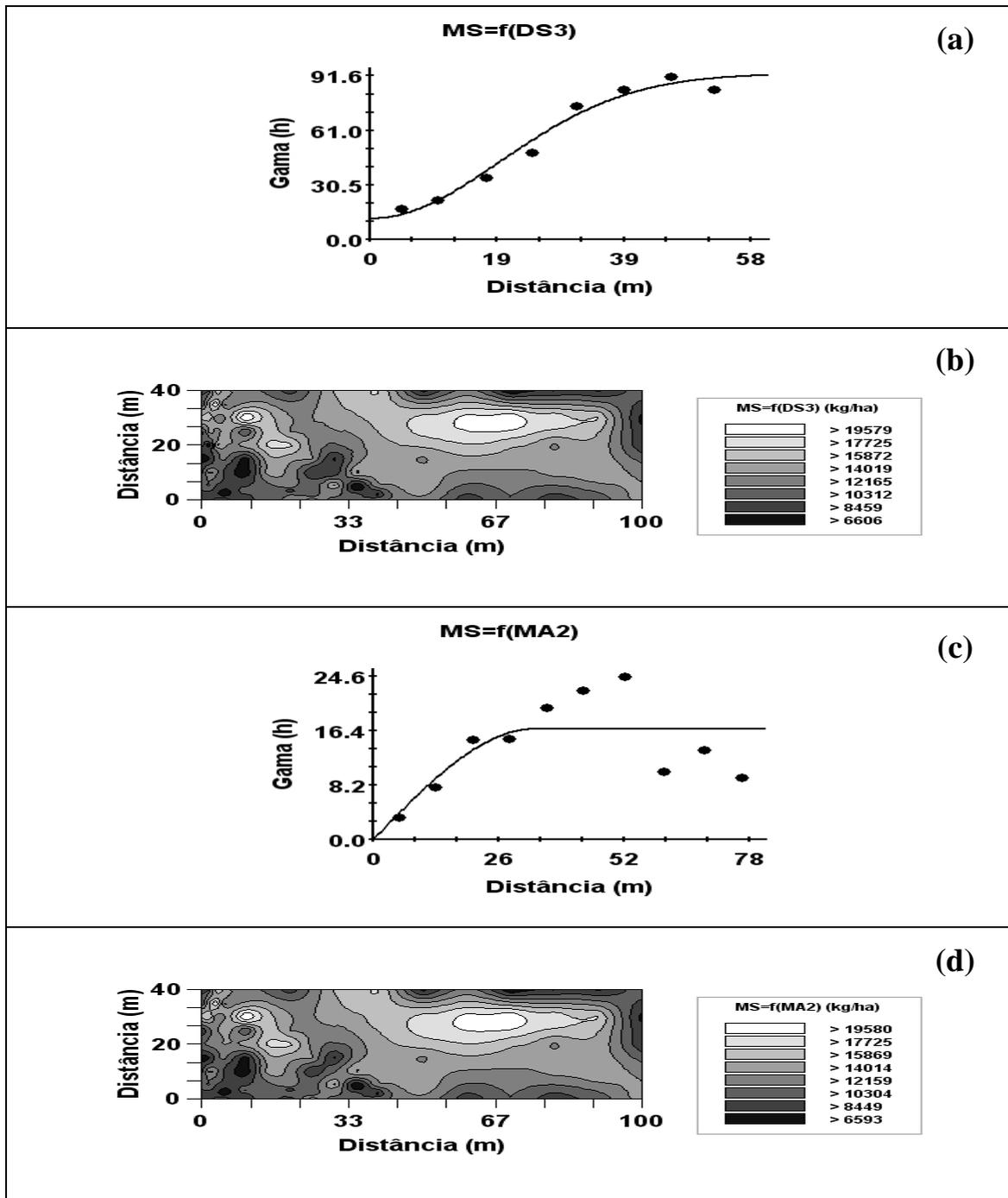


Figura 20: Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função da densidade (DS3) e da macroporosidade (MA2) num Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).

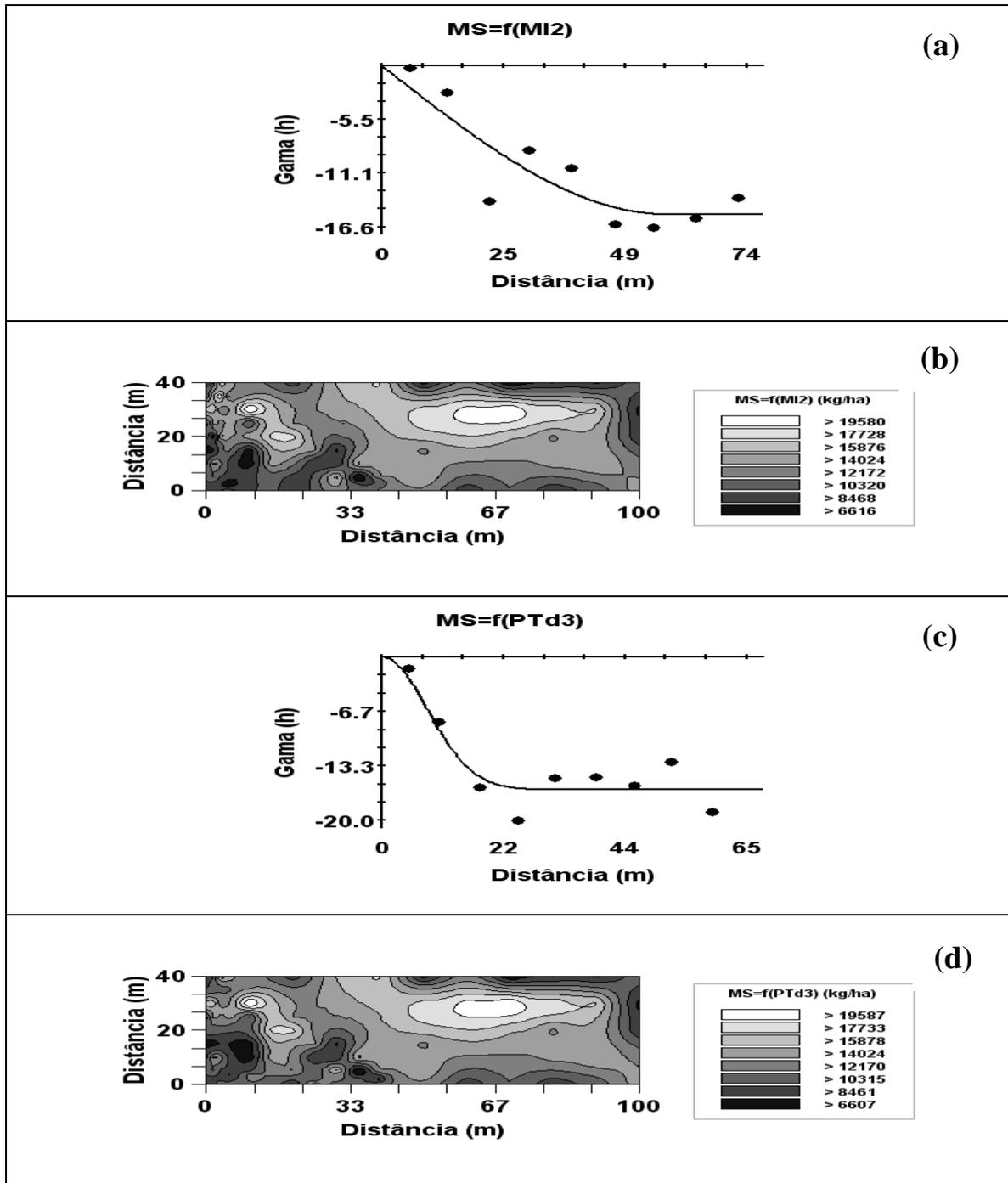


Figura 21: Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função da microporosidade (MI2) e da porosidade total determinada (PTd3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

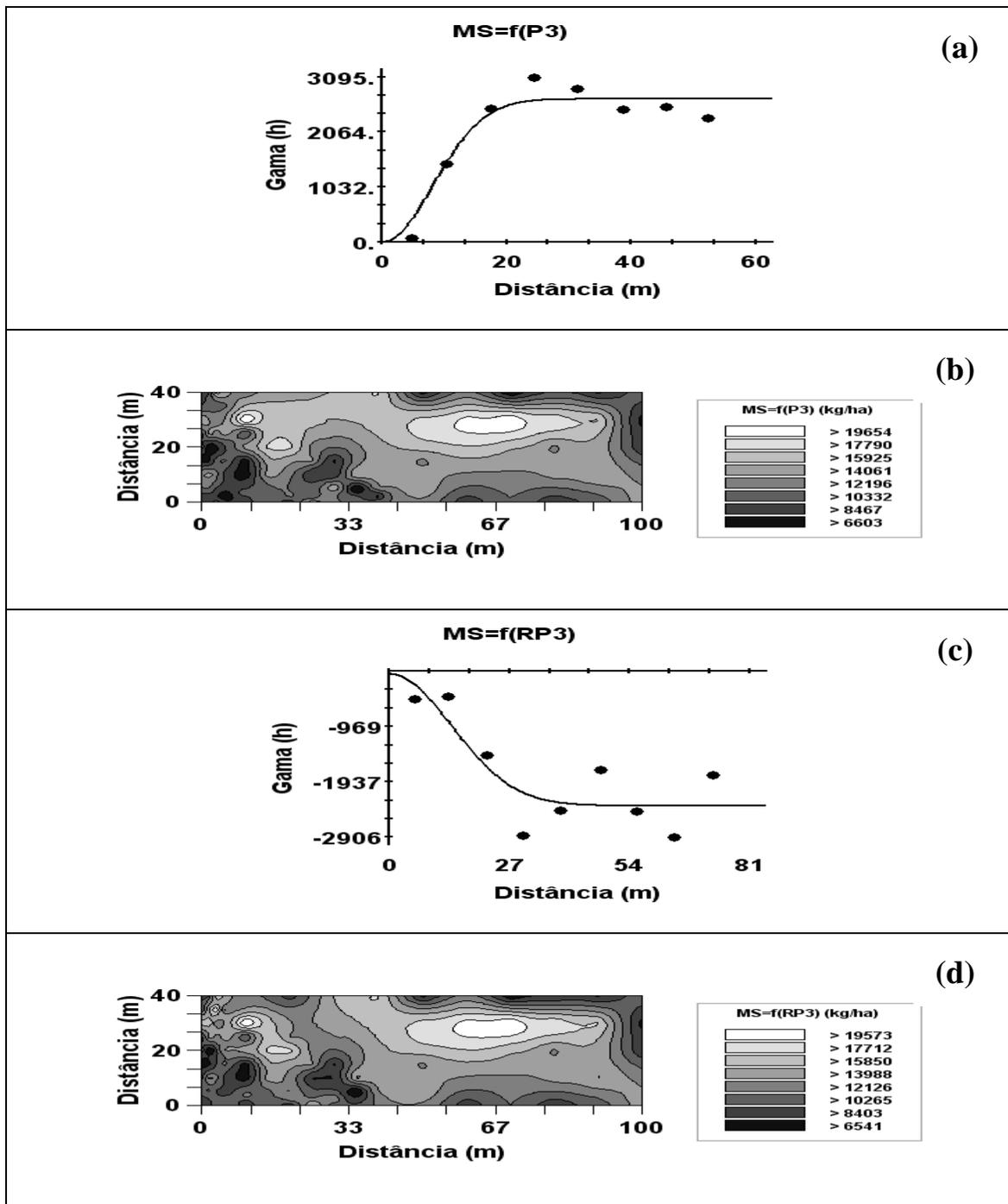


Figura 22: Semivariograma cruzado e mapas de co-krigagem da produtividade de massa seca (MS) do capim-Marandu em função do teor de fósforo (P3) e da resistência mecânica à penetração (RP3) num Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).

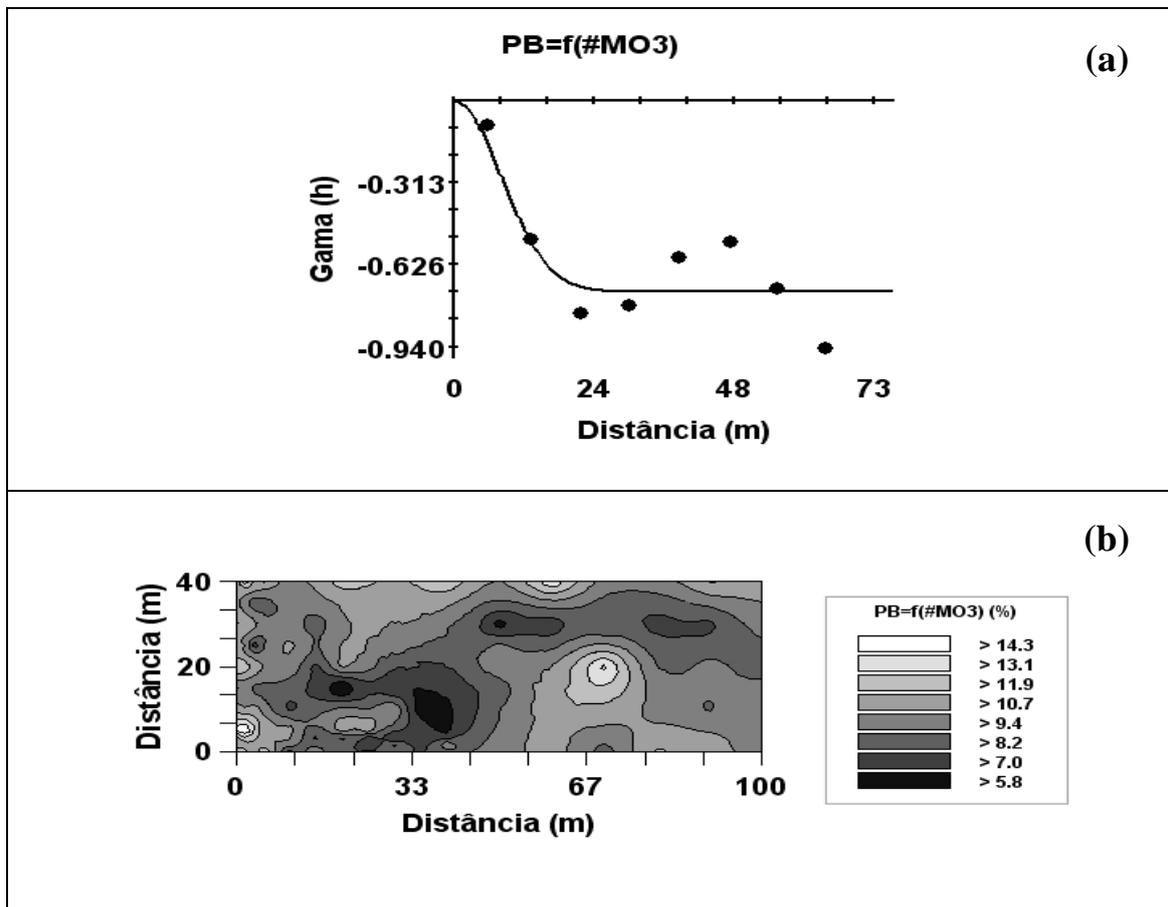


Figura 23: Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem do teor de proteína bruta (PB) do capim-Marandu em função do resíduo do teor de matéria orgânica (#MO3) num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Este comportamento direto do aumento da P na camada de 0,20-0,30 m, com aumento da produtividade de MS provavelmente se deve à grande resposta da *Brachiaria brizantha* e das pastagens em geral em fase de implantação ao aumento do teor de P no solo.

Para o ajuste $MS=f(RP3)$ ficou evidenciado (Quadro 8) que 73,0% da variabilidade espacial da MS da *Brachiaria brizantha* puderam ser explicadas pela variabilidade espacial da RP3. A partir dos resultados deste atributo do solo, pode-se localizar as zonas de manejo físico do solo (descompactação) para a pastagem que foi estabelecida na área experimental pesquisada. Assim, pode-se constatar que onde ocorreram os mais baixos valores de RP3 (Figura 17c) foram mapeados os mais altos valores de MS (Figura 13c e 22d). Em contrapartida, nos mais altos valores da RP3, constatarem-se os mais baixos valores da MS. Portanto, do ponto de vista espacial, a resistência mecânica à penetração, avaliada na camada 0,20-0,30 m (RP3), apresentou-se como um satisfatório indicador da qualidade física do solo

estudado, quando destinado a avaliar a produtividade de MS de *Brachiaria brizantha*. Este comportamento inverso da ocorrência de menor RP no solo na camada de 0,20-0,30 m, com o valor mais alto de MS provavelmente ocorreu devido a menor compactação do solo, que determina provável maior crescimento radicular e conseqüentemente maior absorção de água e nutrientes para a planta fazendo com que houvesse aumento de MS da parte aérea.

Quadro 9: Parâmetros das validações cruzadas referentes as co-krigagens de alguns atributos do capim-Marandu e de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a + b . VE ^(b)	
		a	b
<i>γ(h) cruzados entre MS e atributos do solo</i>			
MS=f(DS2)	0,348	6,465.10 ³	0,485
MS=f(DS3)	0,333	6,786.10 ³	0,457
MS=f(MA2)	0,369	6,094.10 ³	0,513
MS=f(MI2)	0,370	6,207.10 ³	0,507
MS=f(MI3)	0,362	6,253.10 ³	0,497
MS=f(PTd2)	0,332	6,797.10 ³	0,455
MS=f(PTd3)	0,407	5,190.10 ³	0,587
MS=f(P3)	0,390	5,795.10 ³	0,535
MS=f(RP3)	0,335	6,729.10 ³	0,470
MS=f(UV2)	0,349	6,545.10 ³	0,481
MS=f(pH1)	0,386	5,848.10 ³	0,534
MS=f(MO2)	0,387	5,693.10 ³	0,548
MS=f(#MO3)	0,379	5,955.10 ³	0,525
<i>γ(h) cruzados entre PB e atributos do solo</i>			
PB=f(DP1)	0,414	4,340	0,563
PB=f(DS1)	0,460	3,700	0,626
PB=f(DS2)	0,348	5,120	0,479
PB=f(MA1)	0,319	5,430	0,459
PB=f(PTd1)	0,381	4,620	0,539
PB=f(PTd3)	0,412	4,320	0,566
PB=f(UV1)	0,400	4,430	0,557
PB=f(UV2)	0,439	3,880	0,605
PB=f(pH1)	0,318	5,480	0,451
PB=f(#MO3)	0,369	5,080	0,490

^(a)MS = massa seca, PB = proteína bruta, DP = densidade da partícula, DS = densidade do solo, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PTd = porosidade total determinada, P = teor de fósforo, RP = resistência mecânica a penetração, UV = umidade volumétrica, pH = pH em CaCl₂ e MO = matéria orgânica; ^(b) VO = valor observado e VE = valor estimado.

5 CONCLUSÕES

1) A produtividade da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e o teor de proteína bruta da forragem não variaram aleatoriamente e seguiram padrões espaciais bem definidos, com semivariogramas do tipo esférico, com alcances da dependência espacial entre 41,1 e 63,1 m;

2) Os atributos do solo que apresentaram dependência espacial foram densidade do solo, microporosidade, porosidade total determinada e teor de matéria orgânica nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, enquanto que os demais seguiram a seguinte ordem: densidade da partícula, macroporosidade, umidade volumétrica e pH na camada de 0-0,10 m; macroporosidade, teor de P, umidade volumétrica na camada de 0,10-0,20 m e teor de P e resistência mecânica à penetração na camada de 0,20-0,30 m, com semivariogramas do tipo esférico, exponencial e gaussiano, com alcances variando de 6,4 a 73,5 m;

3) A correlação linear simples entre as produtividades de massa fresca e de massa seca da *Brachiaria brizantha* foi alta e positiva;

4) A análise das correlações lineares simples de atributos da planta *versus* do solo mostrou que: com o aumento da RP, na camada de 0,10-0,30 m, houve redução da MS, bem como, com o aumento do teor de P em profundidade ocorrerá o mesmo com a massa seca da *Brachiaria brizantha*;

5) A resistência mecânica à penetração, na camada de 0,20-0,30 comportou-se como bom indicador da qualidade física do solo pesquisado para a estimativa da produtividade de massa seca da *Brachiaria brizantha*, enquanto que o teor de P, nesta mesma profundidade, foi o melhor indicador da qualidade química do solo para estimativa da produtividade da forrageira.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.4, p.519-531, 2004.

ADAMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G.; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W.J. **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, p.33-74. 1987.

AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. Evolução das atividades lavoureiras e pecuária nos cerrados. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p.25-58.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.1, p.151-157, 1996.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavourapecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.717-723, 2001.

ALCÂNTARA, P.B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras gramíneas e leguminosas**. São Paulo: Nobel, 1992. 150p.

ALVARENGA, R.C.; LARA CABEZAS, W.A.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.22, n.208, p.25-36, 2001.

ALVAREZ, V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: CFRMG, 1999. p.43-60.

AMADO, T.J.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa do manejo do resíduo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.1, p.251-257, 1989.

AMADO, T. J. Manejo da palha, dinâmica da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes em plantio direto. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 7., 2000, Foz do Iguaçu. **Resumos...** Foz do Iguaçu: FBPDP, 2000. p.105-111.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.415-422, 2007.

ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M.P. Correlação linear e espacial entre a produtividade da soja com atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

ANDREOTTI, M. et al. Produtividade do milho safrinha e modificações químicas de um latossolo em sistema plantio direto em função de espécies de cobertura após calagem superficial. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n.1, p. 109-115, 2008.

ANGELICO, J. C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.931-936, 2006.

ARAÚJO, A.V.; CORÁ, J.E.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G.; POCAI, V.G. Variabilidade espacial e padrões de ocorrência de atributos de fertilidade do solo para agricultura de precisão. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 24.; REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS. 8.; SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIAO BRASILEIRO DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., Santa Maria, 2000. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM.

ARAÚJO, F. C. M.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial entre a acidez do solo com a produtividade de massa seca do sorgo forrageiro num Latossolo do Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

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

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

ASSIS, R. L. **Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa**. 2002. 141f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

AZENHA, M. V.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; VERCESE, F.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial entre as bases trocáveis com a produtividade de massa seca do sorgo forrageiro num Latossolo do Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

BASSANI, H.J. **Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não-pastejada**. 1996. 90f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1996.

BASSO, F.C.; PARIZ, C.M.; AZENHA, M.V.; VERCESE, F.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M.P. Produtividade de massa seca do sorgo forrageiro correlacionada com a macroporosidade, teor de fósforo e matéria orgânica de um solo do cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Física del suelos**. Mexico: 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: Gênese, 1999. p.9-26.

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. **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2.ed. [S.l.]: Marcel Dekker, 2001. p. 377-403.

BERG, M.V.D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solo na região do Planalto Médio, RS: I. Análise de variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.393-399, 1997.

BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; DOS ANJOS, L.H.C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.837-844, 2007.

BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.987-995, 2001.

BETTERIDGE, K.; MACKAY, A.D.; SHEPHERD, T.G.; BARKER, D.J.; BUDDING, P.J.; DEVANTIER, B.P.; COSTALL, D.A. Effect of cattle and sheep treading on surface

configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collinwood, v.37, n.1, p.743-760, 1999.

BHATTI, A.U.; MULLA, D.J.; FRAZIER, B.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing and Environment**, St. Paul, v.37, n.1, p.181-191, 1991.

BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R. Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na região centro-oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.2, p.843-851, 2008.

BOUMA, J.; STOORVOGEL, J.; van ALPHEN, B.J; BOOLTINK, H.W.G. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63,n.1, p.1763-1768, 1999.

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.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.A.D.; REINERT, D.J.; SEQUINATO, L.; KAISER, D.R. Relações entre a quantidade de palha existente sobre o solo e a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. In: REUNIAO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVACAO DO SOLO E DA AGUA, 15., Santa Maria, 2004. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. CD-ROM

BROCH, D. L. Integração agricultura-pecuária no Centro-Oeste do Brasil. In: ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 4., 1999, Uberlândia. **Plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 53-60.

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.

BUTOLO, J. E. **Qualidade de ingredientes na alimentação animal**. Campinas: J. E. Butolo, 2002. 430p.

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

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CANARACHE, A. Penetr-a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1, p.51-70, 1990.

CARVALHO, M. M.; FILHO, A. B. C.; BOTREL, M.A. Efeito da calagem e da fertilização com fósforo sobre o crescimento do capimcordura em um solo da zona Campos das vertentes, MG. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.22, n.4, p. 614-23, 1993.

CARVALHO, J.R.P.; VIEIRA, S.R.; MARINHO, P.R.; DECHEN, S.C.; MARIA, I.C.; POTT, C.A.; DUFRANC, G. **Avaliação da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo sob plantio direto em São Paulo – Brasil**. Campinas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2001. p. 1-4 (Comunicado Técnico, 12)

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, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, J.R.P.; QUEIROZ, E.F. **Uso da co-krigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária. Área de Comunicação e Negócios, 2002. p.1-4 Disponível em: <www.repdigital.cnptia.embrapa.br/handle/CNPTIA/9880>. Acesso em: 02/03/09.

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

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, v. 27, n.4, p.695-703, 2003.

CARVALHO, F. L. B. M.; CARVALHO, M. P.; D'ALMEIDA JUNIOR, A. J. C.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; NEGRO, S. L.; MONTANARI, R. Correlação espacial da produtividade de forragem de braquiária com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Aluminoférrico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 28.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 12.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 10.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 7., 2008. **Anais...** Londrina: SBCS: IAPAR, EMBRAPA-Soja, 2008. CD-ROM.

CASSOL, L.C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura – pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 143f. Tese (Doutorado)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CECATO, V.; PEREIRA, L. A. F.; GALBEIRO, S.; DOS SANTOS, G. T.; DAMASCENO, J. C.; MACHADO, A. O. Influência das adubações nitrogenadas e fosfatadas sobre a produção e características da rebrota do capim Marandu (*Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf cv. Marandu). **Acta Scientiarum**, Maringá, v.26, n.3, p.399-407, 2004.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; HERBES, M.G.; POLETTO, N.; SILVEIRA, M.J. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.49-54, 2002.

CHAIEB M.; BELGACEM H.; MAKKI B. Impact of clipping on root systems of 3 grasses species in Tunisia. **Journal Range Management**, Denver, v.49, n.4, p.336-339, 1996.

CHUNG, C. K.; CHONG, S. K.; VARSA, E. C. Sampling strategies for fertility on a stoy silt loam soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 26, n.5/6, p. 741-763, 1995.

CICHOTA, R.; van LIER, Q.J.; LEGUIZAMON ROJAS, C.A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.789-798, 2003.

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. **Soil Science**, Baltimore, v.58, n.2, p.275-288, 1944.

CORÁ, J.E. **The potential for site-specific management of soil and yield variability induced by tillage**. 1997. 104f. Tese (Doutorado)-East Lansing, Michigan State University, Michigan, 1997.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G; POCAI, V.G. Definição de zonas homogêneas de manejo visando agricultura de precisão através de caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 24.; REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8.; SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIAO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria:Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM.

CORREA, J.C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.1, p.107-114, 1995.

COUTO, E.G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e potássio trocável em solo esparsamente amostrado no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.129-140, 2000.

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, v.21, n.2, p.241-247, 1997.

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

DEMATTE, J. L.I. **Levantamento detalhado dos solos de Campus experimental de Ilha Solteira**. Piracicaba: departamento de solos, geologia e fertilidade. ESALQ/USP, 1980. 44p.

DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994. 244p.

EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.242-246, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA CNPS. Documentos, 1)

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

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; DA SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.463-476, 2008.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos**: com ênfasis en suelos de América Latina. 2.ed. San José: IICA, 1994. 420p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONCALVES, A.C.A.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S. Variabilidade espacial da resistência mecânica a penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1773-1779, 2006.

FISHER, R.A. **Statistical methods and scientific influence**. Edinburg: Oliver and Boyd, 1956. 175p.

FONSECA, D.M.; ALVAREZ, V.H.; NEVES, J.C.L.; GOMIDE, J.A. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.49-58, 1988.

FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R.F. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: I – Casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.27-34, 1997a.

FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.; ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R.F. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: II – Em campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.35-40, 1997b.

FREGONEZI, G. A. F.; BROSSARD, M.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C. Modificações morfológicas e físicas de um latossolo sob pastagens. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.1017-1027, 2001.

GERDES, L.; WERNER, J.C.; COLOZZA, M. T.; POSSENTI, R.A.; SCHAMMASS, E. A. Avaliação de características de valor nutritivo das gramíneas forrageiras marandu, setária e tanzânia nas estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, n.4, p.955-963, 2000.

GOEDERT, W.J. Região dos Cerrados: Potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.1, p.1-17, 1989.

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.223-227, 2002.

GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A.; OLIVEIRA, P.M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.435-443, 2007.

GOMIDE, J.A.; GOMIDE, C.A.M. Escolha da forrageira para a formação da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 24., 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2007. p.7-37.

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

GONÇALVES, A. C. A.; 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 EN EL MANEJO DEL SUELO Y AGUA EN LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA, 1., La Plata, 1998. **Anais...** La Plata: UNLP, 1998. p.113-119.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratórias e geoestatísticas da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-1157, 2001.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GEOSTATISTICS for environmental sciences – GS+: desing software 7. ed. Michigan: Gamma, 2004. 159p

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Relações espaciais entre fertilidade do solo e produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 28.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 12; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 10.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 7., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja: SBCS: IAPAR: UEL, 2008. 1 CD-ROM.

GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 472p.

GUIMARÃES, E.C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argiloso da região do cerrado submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** 2000. 90f. Tese (Doutorado)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 77p.

GUSS, A.; GOMIDE, J.A.; NOVAIS, R.F. Exigências de fósforo para estabelecimento de quatro espécies de Brachiaria em solos com características físico-químicas distintas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.19, n.4, p.278-289, 1990.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1/2, p.85-97, 1995.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 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 distrofico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.212-219, 2004.

KANNO, T.; MACEDO, M. C. M.; EUCLIDES, V. P. B.; BONNO, J.A.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; ROCHA, M.C.; BERETTA, L.G.R. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian Savannas. **Grassland Science**, Tóquio, v.45, n.1, p.9-14, 1999.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153f. Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

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

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, v.31, n.2, p.361-369, 2007.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.2, p.395-401, 1995.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. 570 p.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; STONE, L. F.; COBUCCI, T. Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.106, n.1, p. 1-20, 2004.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. **É necessária a descontinuidade do sistema plantio direto após dez anos de adoção?** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co43.htm>. Acesso em: 24/11/2008.

LAL, R.; LOGAN, T.J. Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; LEVINE, E.; STEWART, B.A., (Ed.). **Soil management greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.293-307.

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

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LIMA, R. C. **Produtividade da forragem do milho em função de atributos físicos do solo sob plantio direto na fazenda Bonança de Pereira Barreto (SP)**. 2007. 73f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2007.

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

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.591-599, 2007.

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. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

MARTINS, B. C. **Análise da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho Distrófico em função do grau de umidade.** 2002. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

MARTINS NETTO, D. A.; DURÃES, F. O. M. **Milheto: tecnologias de produção e agronegócio.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 215p.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Stanford, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Closing 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, 1986.

MEDINA, H. P. Constituição física. In: MONIZ, A.C. (Org.). **Elementos de pedologia.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975b. p. 11-20.

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, v.32, n.2, p.781-788, 2008.

MELO, S. P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-Marandu num Latossolo vermelho amarelo.** 2005. 95f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

MILLER, M.P.; SINGER, M.J.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.52, n.4, p.1133-1141, 1988.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p.839-847, 2006.

MORAES, A.; LUSTOSA, S.B.C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPOSIO SOBRE A AVALIACAO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, 15, 1997, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 1997. p.129-149.

MOTOMIYA, A.V.A.; CORA, J.E.; PERREIRA, C.T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.3, p.485-496, 2006.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M.F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P.F.S. Degradação de pastagens na região amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento das raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1409-1418, 2001.

MUZILLI, O. **A adubação verde como alternativa para a melhoria da fertilidade do solo e racionalidade do uso de fertilizantes**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1986, p.17. (Informe de Pesquisa, 68).

OLIVEIRA, J. B.; MONIZ, A. C. Levantamento pedológico detalhado da estação experimental de Ribeirão Preto, SP. **Revista Bragantia**, Campinas, v.34, n.2, p.59-114, 1975.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.4, p.783-789, 1999.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A. A análise química do solo e recomendação de adubação. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool/Planalsucar, 1983. p. 155-178.

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

PÉREZ-GOMAR, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J. Resistência à penetração de vertissolo a diferentes umidade e usos do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 14., 2002, Cuiabá: **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROM.

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

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

RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

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

ROSA FILHO, G. **Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2008.

ROSCOE, R.; BODDEY, R.M.; SALTON, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M.; SALTON, J.C. (Ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p.17-43.

SALTON, J. C. Raiz: a solução do problema. **Direto no Cerrado**, Brasília, v. 6, n.19, p. 6-7, jan./fev. 2001

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, v.22, n.1, p.115-122, 1998.

SANTOS, H.L.; VASCONCELLOS, C.A. Determinação do numero de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.2, p.97-100, 1987.

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 distroférrico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.28, n.3, p.313-321, 2006.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.B. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-78, 2002.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1369-1377, 2008.

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, n.1, p.591-611, 1965.

SILVA, G.P.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.39, n.221, p.31-43, 1992.

SILVA, I.F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.1, p. 1175-1784, 1994.

SILVA, J. E. P. **Parâmetros produtivos e atividade de fosfatase ácida em três gramíneas forrageiras cultivadas com doses de fósforo**. 1996. 81f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.12, p.2485-2492, 2000.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.5, p.795-801, 2000.

SILVA, J. R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: entraves e possibilidade no Estado de São Paulo. **Informativo Econômico**, Rio de Janeiro, v.31, n.2, p.51-57, 2001.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de Alimentos: métodos químicos e biológicos.** Viçosa: UFV, 2002. 235p.

SILVA, V. R.; REICHERDT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um latossolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.6, p.1013-1020, 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 JUNIOR, A. **Propriedades físico-químicas de um latossolo vermelho de cerrado sob adubações orgânica e mineral após 20 anos de pastagem.** 2005. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P.; SILVA, S.C.; CUNHA, A.A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.10, p. 2057-2064, 2000.

SIMÕES, W. L.; SILVA, E. L.; LIMA, D. M.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.1061-1068, 2006.

SOEST, P. J. Van. **Nutritional ecology of the ruminant.** 2.ed. New York: Cornell University Press. 1994. 476 p.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2.ed. Brasília: Embrapa, 2004. 416p.

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

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, v.21, n.3, 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 sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.77-86, 1998.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de fatores de acidez no solo em diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.5, n.3, p.83-98, 1999.

SOUZA, L.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrofico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroferico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.309-319, 2004a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, 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 Ambiental**, Campina Grande, v.28, n.2, p.51-58, 2004b.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PERREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Influencia da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.1, p.1-11, 2004.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PERREIRA, G.T.; MONTANARI, R. Otimização amostral de atributos de Latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.829-836, 2006.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para a cultura da cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 31, n.2, p.371-377, 2007.

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

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**, Campinas, v.15, n.1, p.229-235, 1991.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARAES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A.A. Resistência do solo a penetração em resposta ao numero de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.487-494, 2008.

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

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J.C.; FABIAN, A.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.609-618, 2005.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K. e UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-94, 1985.

TRECENTI, R. Técnicas de consórcio ajudam na formação de palha para o plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.86, n.1, 2005.

TREIN, C.R.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. 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**, Viçosa, v.15, n.1, p.105-111, 1991.

VAUCLIN, S.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.1, p.175-184, 1983.

VENDRUSCULO, L.G. **Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística**. 2001.87f. Tese (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

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, n.4, p.1040-1048, 1981.

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

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

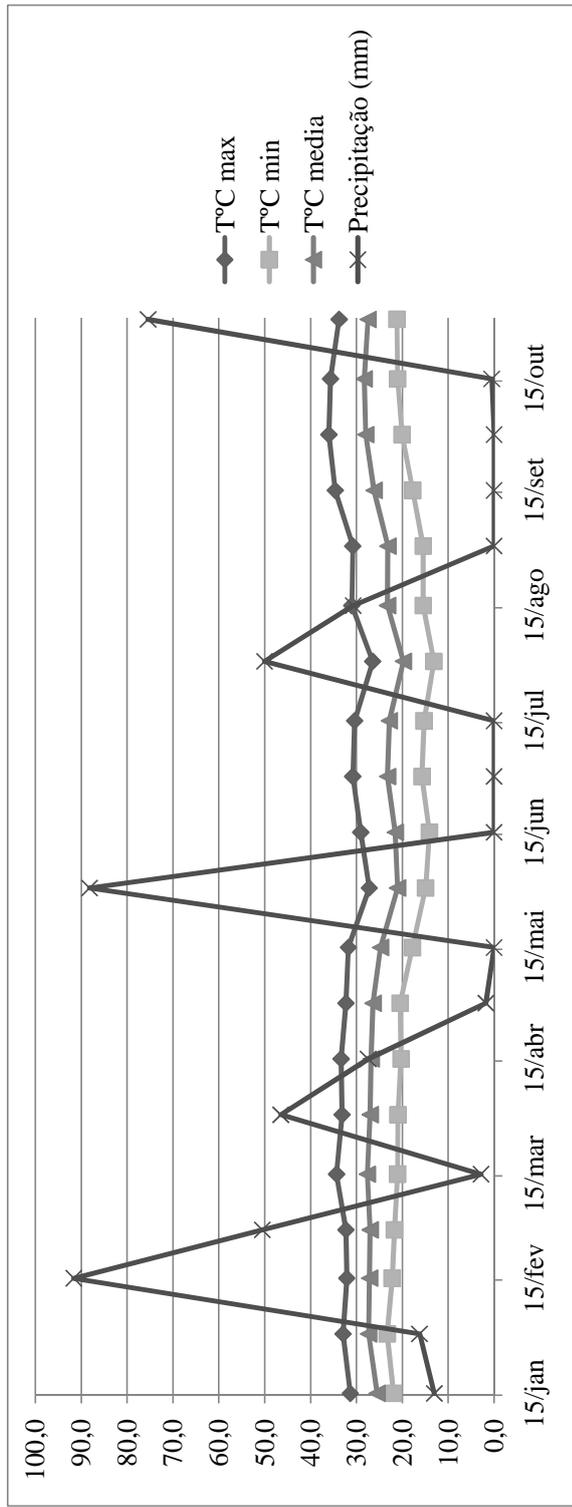
VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo: In NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, n.1, p.1-55.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, London, v.3, n.1, p.1-70, 1985.

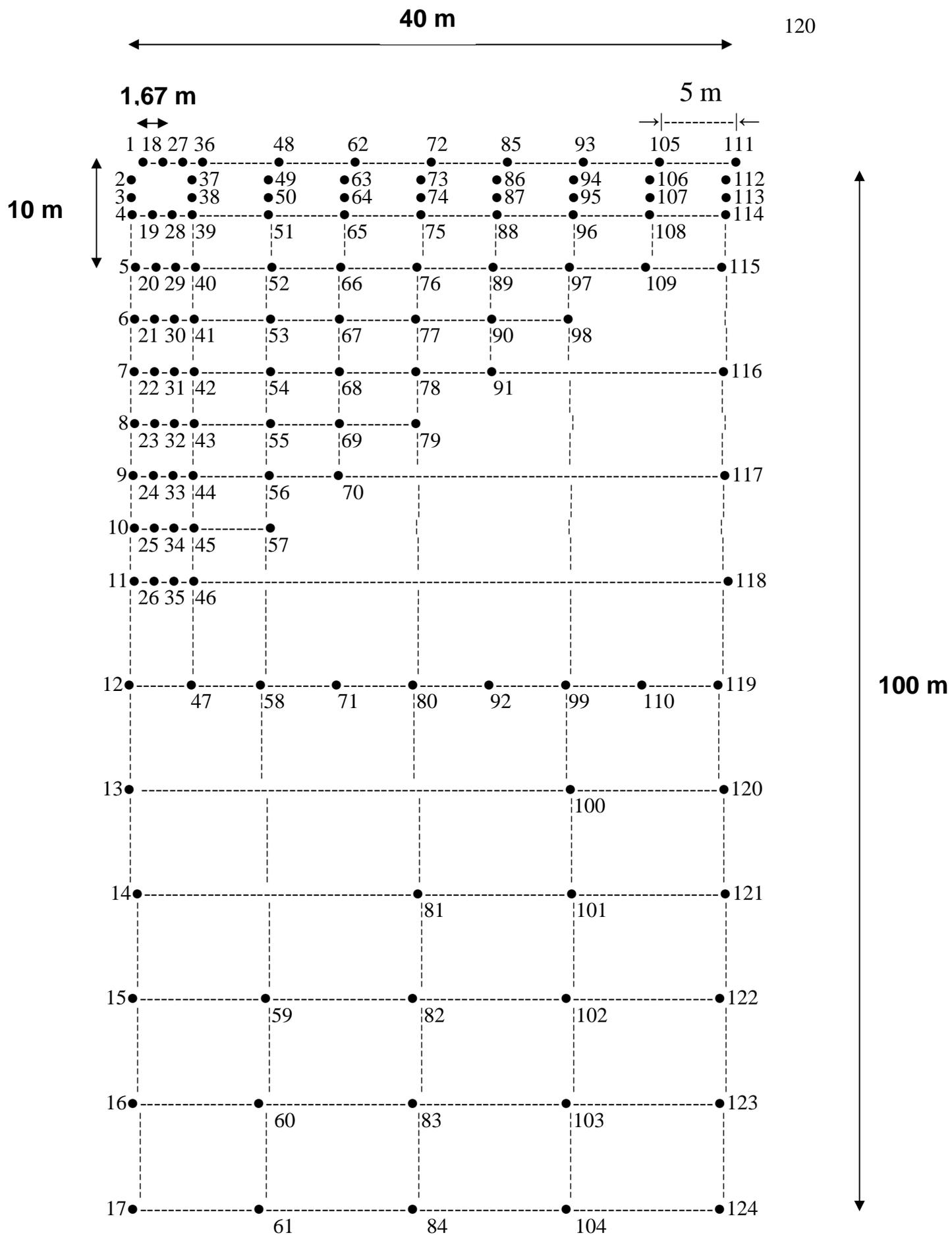
WEILL, M.A.M. **Estimativa da erosão do solo e avaliação do seu impacto na microbacia do Ceveiro (Piracicaba-SP), através do índice de tempo de vida**. 1999. 100 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

WERNER, J. C. **Adubação de pastagem**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986.49p. (Instituto de Zootecnia. Boletim Técnico, 18).

ZIMBACK, C.R.L. **Geoestatística**: grupo de estudos e pesquisas agrárias georreferenciadas. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2003. p.1-25.



Apêndice A: Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento no período compreendido entre janeiro de 2007 á outubro de 2007.



Apêndice B: Esquema de campo da malha experimental de coletas de resultados sequencialmente, do ponto amostral 1 até o 124.