UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

# "Produtividade de Forragem do Milho em Função de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob Plantio Direto"

**RONALDO CINTRA LIMA**
***Engenheiro Agrônomo***

Orientador: Prof. Dr. Luiz Malcolm Mano de Mello
Co-Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

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

Especialidade: Sistemas de Produção

Ilha Solteira – SP
Agosto/2007

# Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

FICHA CATALOGRÁFICA

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

Lima, Ronaldo Cintra.
L732p Produtividade de forragem do milho em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto / Ronaldo Cintra Lima. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007
73 f. : il. , fots. (color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2007

Orientador: Luiz Malcolm Mano de Mello
Co-orientador: Morel de Passos e Carvalho
Bibliografia: p. 66-73

1.Física do solo – Qualidade. 2. Solos – Manejo. 3. Agricultura de precisão. 4. Milho - Forragem. 5. Correlações lineares e espaciais. 6. Plantio direto.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: Produtividade da Forragem do Milho em Função de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob Plantio Direto**

AUTOR: **RONALDO CINTRA LIMA**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Malcolm Mano de Mello

DATA DA REALIZAÇÃO: 15 de agosto de 2007

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em AGRONOMIA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. **LUIZ MALCOLM MANO DE MELLO**
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Marcelo Andreotti

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

Dr. **RUBENS SIQUEIRA**
Pesquisador, Instituto Agronômico do Paraná / Londrina-PR

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e oportunidade por mais esta etapa, pela minha família, a Léo e aos meus filhos, Gustavo, Maurício e Vitor, pelo carinho, amor, paciência e compreensão, aos meus pais (in memória), aos meus irmãos, parentes e amigos que me incentivaram em todos os instantes desta caminhada e nas oportunidades concedidas.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP – Campus de Ilha Solteira por mais esta chance de realizar este curso de Mestrado em Agronomia – área de concentração em Sistema de Produção.

À Fazenda Bonança do grupo da Pecuária Damha, pela concessão da área e apoio para que esse trabalho de pesquisa fosse realizado e também a todos os funcionários que sempre me auxiliaram com informações e execução das atividades.

Ao Prof. Dr. Luiz Malcolm Mano de Mello pela Orientação, amizade e confiança depositada, pelo incentivo durante todo este tempo.

Ao Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho pela Co-Orientação, amizade, e pela valiosa colaboração em fases importantes desta caminhada.

Aos Professores e funcionários do DEFERS, pela paciência e presteza na realização dos trabalhos referentes ao curso, pela amizade e espírito de coleguismo recebido; e também a concessão e flexibilização da minha jornada de trabalho, pois, sem isto não seria possível à realização do meu aprimoramento acadêmico.

Aos queridos colegas dos cursos de graduação e pós, César Gustavo, Claudia, Arthur, Vanzela, Elton, Jean, Diego, Tomazine, Hernandez, Everaldo, Larissa, Renata, Renato, pela ajuda, apoio, amizade, companheirismo e pelos bons momentos no convívio nesta etapa.

A todos os professores da pós-graduação pelos ensinamentos, que tanto contribui para o meu aprimoramento acadêmico e profissional.

Aos funcionários da FEP – Fazenda de ensino e pesquisa pelo apoio.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente, teve uma participação nesta minha jornada, e mais uma vez não poderia deixar de agradecer ao colega César Gustavo pela colaboração.

Em fim a todos um muito obrigado.

**LIMA, R. C. Produtividade de forragem do milho em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto.** Ilha Solteira, 2007, 73p. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

## RESUMO

A cultura do milho apresenta sistema radicular com alto potencial de desenvolvimento. Assim sendo, os atributos físicos do solo são de extrema importância à sua produtividade, uma vez que em condições adversas podem dificultar a penetração das raízes, e conseqüentemente limitar o adequado aproveitamento dos nutrientes e da água disponível. No ano de 2005, na Fazenda Bonança (Agropecuária Dahma), município de Pereira Barreto (SP), Brasil (20°40'12'' latitude S; 51°01'50'' longitude W), foi instalado o presente ensaio em uma área irrigada por pivô central e manejada no sistema de integração agricultura-pecuária, com plantio direto de milho sobre brachiária. Os atributos analisados foram: produtividade de forragem do milho (MSF), macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT), densidade (DS), resistência à penetração (RP) e umidade gravimétrica (UG) de um Latossolo Vermelho Distrófico (Acrustox Háplico), nas profundidades 1 (0-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m). O objetivo foi estudar a variabilidade e as correlações lineares e espaciais entre os atributos da planta e do solo, visando selecionar um indicador da qualidade física do solo de boa representatividade para a produtividade da forragem. Foi instalada a malha geoestatística para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 125 pontos amostrais, numa área de 2500 $m^2$ e declive homogêneo de 0,025 m/m. No geral, os atributos estudados, além de não terem revelado distribuição aleatória, apresentaram variabilidade entre baixa e muito alta. Seguiram padrões espaciais claramente definidos, com alcances da dependência espacial entre 6,6 e 31,1 metros. Assim, o maior alcance que poderá assegurar extrema semelhança em magnitude para qualquer atributo estudado, e que poderá alimentar os pacotes computacionais direcionados à agricultura de precisão, deverá ser de 31,1 metros. Apesar da correlação linear simples entre a MSF com a MI2 ter sido baixa, foi extremamente significativa. Contudo, do ponto de vista espacial, houve elevada correlação inversa entre tais variáveis. Portanto, nos sítios onde a MI2 apresentou seus maiores valores, a MSF atingiu as menores cifras, sendo perfeitamente verdadeiro o inverso. Assim, a MI2 apresentou-se como excelente indicador da qualidade física do solo, quando destinado à produtividade de forragem do milho.

**Termos de indexação:** integração agricultura-pecuária, manejo do solo, qualidade física do solo, agricultura de precisão, *Zea mays.*

**LIMA, R. C. Corn forage yield regarding physical features of a Typic Hapludox under the no-tillage system.** Ilha solteira, 2007, 73p. Dissertation. (Master´s Degree of Systems of Production) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.


## ABSTRACT

Corn crops have great potential of root development. Therefore, the physical soil features are of great importance to the crops yields, as the unfavorable conditions may hinder root penetration and, thus, limit the nutrient and available water uptake. This experiment was established in 2005, on Bonança Farm (Dahma Agrarian), in Pereira Barreto (SP), Brasil (20°40'12'' latitude S; 51°01'50'' longitude W), in an area which was irrigated with center-pivot and managed according to the crop-livestock integration system, with corn under the no-tillage on *Brachiaria*. The analyzed characteristics were: corn forage yield (CFY), macroporosity (MA), microporosity (MI), total porosity (TP), density (SD), penetration resistance (PR) and gravimetric moisture (GM) of a Typic Hapludox in the depths of 1 (0-0.10 m), 2 (0.10-0.20 m) and 3 (0.20-0.30 m). The objective was to study the variability and the linear and spatial correlations between the plant and the soil features, aiming at selecting an indicator for the physical quality of the soil which represents forage yield. A geostatistical mesh was installed for data collecting regarding the soil and the plant, with 125 sampling stations, in an area of 2500 $m^2$ and homogeneous slope of 0.025 m/m. On the whole, the evaluated features, besides not showing random distribution, showed variability between low and very high. Spatial patterns which were clearly defined with the ranges of spatial dependence between 6.6 and 31.1 m have been followed. Therefore, the greatest range which can assure extreme magnitude similarity for any of the studied features, and which will be able to feed the software designed for precision farming, must be of 31.1 m. Despite the fact that the simple linear correlation between CFY and MI2 was low, it was extremely significant. However, from the spatial point of view, there has been high inverse correlation between such variables. Therefore, where the MI2 showed highest values, the CFY reached the lowest values, for which the inverse was perfectly true. Thus, the MI2 proved to be an excellent indicator for the physical quality of the soil, when it is intended to grow corn forage.



**Keywords:** crop-livestock integration, soil management, physical quality of the soil, precision farming, *Zea mays*.

## LISTA DE FIGURAS


| Figura | | Página |
|---|---|---|
| 01 | Modelo de semivariograma experimental e teórico..... | 20 |
| 02 | Vista geral da cultura do milho ao final do crescimento (29/04/05)..... | 25 |
| 03 | Esquema da malha experimental alocada na Fazenda Bonança, município de Pereira Barreto (SP)..... | 26 |
| 04 | Semivariogramas simples dos atributos (MSF, AMEA, ALT E DMC) da produtividade do milho sob um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 43 |
| 05 | Semivariogramas simples dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 44 |
| 06 | Semivariogramas simples dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 e DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 45 |
| 07 | Semivariogramas simples dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 46 |
| 08 | Validação cruzada dos atributos (MSF, AMEA e ALT) da produtividade do milho em um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 49 |
| 09 | Validação cruzada dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 50 |

| Figura | | Página |
|---|---|---|


10 Validação cruzada dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 e DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... 51

11 Validação cruzada dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... 52

12 Mapas de krigagem dos atributos (MSF, AMEA E ALT) da produtividade do milho em um Latossolo Vermelho Distrófico..... 54

13 Mapas de krigagem dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... 55

14 Mapas de krigagem dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 E DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... 56

15 Mapas de krigagem dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico..... 57

16 Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade de massa seca da forragem do milho (MSF) em função da macroporosidade (MA2) e da microporosidade (MI2 e MIM) em um Latossolo Vermelho Distrófico ..... 61

17 Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade de matéria seca da forragem do milho (MSF) em função da porosidade total (PT1), densidade do solo (DS1), resistência mecânica à penetração (RP1) e umidade gravimétrica (UG3) em um Latossolo Vermelho Distrófico..... 62

**Figura** **Página**

18 Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da altura de plantas do milho (ALTt) em função da microporosidade (MI2) e resistência mecânica à penetração (RPMa); da porosidade total (PT) em função da macroporosidade (MA1), e da macroporosidade (MA1) em função da densidade global (DS1) em um Latossolo Vermelho Distrófico..... 63

## LISTA DE QUADROS


| Quadro | | Página |
|---|---|---|
| 01 | Cor, análise granulométrica e química de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 25 |
| 02 | Análise descritiva de alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 32 |
| 03 | Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 36-37 |
| 04 | Equação de regressão linear simples e coeficientes do ajuste entre atributos da produtividade de forragem do milho sob um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 40 |
| 05 | Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 42 |
| 06 | Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 48 |
| 07 | Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 58 |
| 08 | Parâmetros das validações cruzadas referentes às cokrigagens entre alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico..... | 60 |

**SUMÁRIO**

**Página**

1. INTRODUÇÃO ..... 12

2. DESENVOLVIMENTO ..... 15
2.1. Cultura do milho ..... 15
2.2. Solo agrícola ideal frente à relação massa/volume ..... 15
2.3. Principais atributos físicos do solo diretamente implicados com sua relação massa/volume ..... 16
2.3.1. Resistência mecânica à penetração e umidade ..... 16
2.3.2. Densidade do solo ..... 17
2.3.3. Porosidade do solo ..... 18
2.4. Conceitos básicos necessários à geoestatística ..... 19
2.4.1. Variabilidade da produtividade do milho e dos atributos da relação massa/volume do solo ..... 22
2.4.2. Variabilidade espacial da produtividade do milho e dos atributos da relação massa/volume do solo ..... 23

3. MATERIAL E MÉTODOS ..... 24
3.1. Caracterização do local de origem dos dados experimentais ..... 24
3.2. Implantação e condução da cultura do milho ..... 24
3.3. Implantação e caracterização da malha experimental ..... 26
3.4. Coleta e análise dos atributos da planta ..... 27
3.5. Coleta e metodologia de determinação dos atributos do solo ..... 28
3.6. Análise estatística dos dados ..... 28
3.6.1. Análise descritiva dos dados ..... 29
3.6.2. Análise de regressão ..... 29
3.6.3. Análise geoestatística ..... 29

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 31
4.1. Análise descritiva dos dados ..... 31
4.1.1. Variabilidade dos dados dos atributos estudados ..... 31
4.1.1.1. Atributos da planta ..... 31

4.1.1.2. Atributos do solo..... 31
4.1.2. Distribuição de freqüência e valores médios dos atributos estudados ..... 33
4.1.2.1. Atributos da planta..... 33
4.1.2.2. Atributos do solo..... 33
4.2. Análise de regressão entre os atributos estudados..... 35
4.2.1. Regressão linear simples..... 35
4.2.1.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos estudados ..... 35
4.2.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta..... 35
4.2.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo..... 35
4.2.1.1.3 Atributos do solo versus atributos do solo.....39
4.2.1.2. Regressão linear simples entre os atributos estudados ..... 39
4.2.2. Regressão linear múltipla ..... 40
4.3. Análise geoestatística dos atributos estudados..... 41
4.3.1. Análise semivariográfica simples ..... 41
4.3.1.1. Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos estudados..... 41
4.3.1.2. Validação cruzada dos semivariogramas simples dos atributos estudados ..... 47
4.3.1.3. Mapas de krigagem dos atributos estudados..... 53
4.3.2. Análise semivariográfica cruzada ..... 53
4.3.2.1. Ajuste dos semivariogramas cruzados entre os atributos estudados..... 53
4.3.2.2. Validação cruzada dos semivariogramas cruzados entre os atributos estudados..... 59
4.3.2.3. Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem entre os atributos estudados. ..... 59

5. CONCLUSÕES ..... 65

6. REFERÊNCIAS ..... 66

## 1. INTRODUÇÃO

Solo agrícola ideal, à luz da físico-química coloidal, pode ser considerado como um sistema trifásico natural e disperso. Assim, cada fase, entre as quais a sólida, a líquida e a gasosa, encontra-se intimamente ligada às outras duas. Sendo a fase sólida pouco variável, ocupando metade do seu volume, dado por aproximadamente 45% de componentes minerais e 5% de orgânicos. As fases líquida e gasosa, encerrando sua porosidade total e compondo a outra metade, são representadas por 33% de microporosidade, que é o espaço poroso destinado à retenção de água, assim como por 17% de macroporosidade, espaço poroso que contém a aeração do solo.

Densidade global do solo, ou simplesmente densidade do solo, refere-se à relação existente entre a massa de uma amostra indeformada e seca do solo (monólito) e o respectivo volume total, isto é, o volume ocupado pelas suas três fases. Por possuir estreita relação com outros atributos, a grande maioria das pesquisas converge para o fato de que com o seu aumento ocorre uma diminuição da porosidade total, da macroporosidade, da condutividade hidráulica e da absorção iônica, assim como com o conseqüente aumento da microporosidade, umidade e da resistência mecânica à penetração do solo. Tal fato, por gerar o estado de solo compactado, viria a desencadear uma diminuição da produtividade agrícola.

A capacidade de armazenamento de água e de retenção e a disponibilidade de nutrientes são fortemente influenciadas pelos atributos do solo relacionados com a sua relação massa/volume, entre os quais a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade global, resistência à penetração e a umidade. As operações agrícolas por diversas vezes modificam as características dessas relações, colocando em risco seus processos dinâmicos, os quais se acham intimamente dependentes da porosidade. Tais atributos exercem grande influência na dinâmica entre as fases sólida, líquida e gasosa, podendo dificultar a penetração das raízes e, por conseqüência, o adequado aproveitamento dos nutrientes, da água

e do ar, essenciais ao desenvolvimento vegetal.

O milho constitui-se num dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo. Atualmente no Brasil, terceiro maior produtor mundial desse grão, dois terços da sua utilização são destinados ao consumo animal, sendo o restante para outros fins. Esse cereal é considerado com sendo o de melhor qualidade para fins de forragem e silagem, sendo muito utilizado na alimentação de bovinos de leite e mais recentemente em confinamento de gado de corte. Como forragem, apresenta produtividade média de 20-30 t/ha de massa verde, equivalendo a 8-12 t/ha de massa seca. Entretanto, há casos em que seu potencial de produtividade é superior a 20 t/ha de massa seca, dependendo da fertilidade do solo, do cultivar e do clima. Por apresentar um sistema radicular com alto potencial de desenvolvimento, os atributos físicos do solo, sobretudo aqueles estabelecidos pela relação massa/volume, são muito importantes a essa cultura, podendo, em condições adversas, dificultar a penetração das raízes e, conseqüentemente, limitar o adequado aproveitamento dos nutrientes e da água disponível.

A agricultura de precisão, representada por toda tentativa de desenvolvimento econômico do meio rural, é apoiada no ótimo da eficiência gerencial, que determinadas áreas agrícolas necessitam, de forma localizada no espaço. Assim, a partir do mapeamento das correlações existentes, diretas e/ou indiretas, entre os atributos do solo e a produtividade das culturas, pode-se efetuar a execução de determinada prática conservacionista, tal como a adubação e/ou descompactação, de forma direcionada e com taxas variáveis. Portanto, nas áreas de menores produtividades agrícolas, normalmente associadas aos baixos níveis de fertilidade do solo, seriam destinadas as maiores taxas de fertilizantes e corretivos, sendo perfeitamente válido o inverso. A partir do georreferenciamento da maioria das informações necessárias, podem ser editados mapas digitais para todas elas, isoladas ou conjuntamente, objetivando a aplicação final dos insumos com taxas variáveis.

A geoestatística é utilizada para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, tendo o semivariograma como elemento que atesta sua aplicabilidade. Seu uso requer a coleta de amostras previamente planejadas, com a localização espacial exata de cada ponto amostral. Estudos geoestatísticos têm relatado a influência dos atributos do solo sobre o padrão e a distribuição espacial da produtividade vegetal. Assim, sabe-se que a planta atua de forma a responder, sobretudo quando sua produtividade é analisada espacialmente, de forma positiva e/ou negativa, conforme o comportamento da variabilidade dos atributos do solo. Por outro lado, sendo o semivariograma uma ferramenta básica de suporte às técnicas geoestatísticas de mapeamento por krigagem, ele permite representar quantitativamente o

comportamento espacial de uma variável regionalizada representante de um atributo qualquer. O Semivariograma é caracterizado por três parâmetros: patamar, efeito pepita e alcance. Este último representa a distância na qual o valor de um determinado atributo é estatisticamente igual. Assim, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. Contudo, passam a assumir valores diferentes, maiores ou menores, somente para distâncias estabelecidas a partir do seu valor. Seu conhecimento é de extrema importância à agricultura de precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora, e assim poder efetuar a distribuição no terreno de um determinado insumo com taxas variáveis.

Diante do exposto, a presente pesquisa, realizada num Latossolo Vermelho Distrófico da Fazenda Bonança - Agropecuária Damha, município de Pereira Barreto (SP), objetivou: a) analisar a variabilidade dos atributos estudados da planta e do solo; b) definir as correlações lineares e espaciais entre a produtividade de forragem do milho outonal (safrinha) com os atributos da relação massa/volume do solo pesquisado, e c) pesquisar, entre os atributos do solo, aquele que venha a se apresentar como indicador da sua qualidade física, visando ao aumento da produtividade de forragem do milho para o local estudado.

# 2. DESENVOLVIMENTO

## 2.1. Cultura do milho

O milho é uma planta da família *Poaceae*, da espécie *Zea mays L.* Em função do potencial produtivo e químico-nutritivo constitui-se num dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo. No Brasil, suas diversas utilizações são da ordem de 63,5% para o consumo animal; 10,0% industrial; 3,6% humano; 13,6% exportação; 8,7% outros, enquanto que as perdas representam 0,6%. É uma das principais fontes de energia para ruminantes, confinados ou suplementados, responsável por cerca de 70% da energia e 24% da proteína das rações. Pode ainda ser usado na produção animal na forma de silagem da planta inteira, silagem dos grãos úmidos, grãos, espiga (grãos com palha e sabugo) e planta inteira seca (rolão) (BORGHI, 2001).

Atualmente o país destaca-se como o terceiro maior produtor mundial, porém, a produtividade média é consideravelmente baixa, da ordem de 3352 kg de grãos/ha. Para silagem, o milho que é considerado a forrageira de melhor qualidade, sendo muito utilizado na alimentação de gado leiteiro, e mais recentemente de gado confinado para engorda. Apresenta produtividade em torno de 20-30 t/ha de massa verde, equivalendo a 8-12 t/ha de massa seca. Alguns trabalhos mostram produtividades variando entre 13770 a 14780 kg/ha de massa seca. Entretanto, há casos em que seu potencial de produtividade pode ser superior a 20 t/ha de massa seca, dependendo da fertilidade do solo, do cultivar e do clima (FAHL et al., 1998; BORGHI, 2001; CRUZ et al., 2001; LIMA, 2005; EMBRAPA, 2006).

## 2.2. Solo agrícola ideal frente à relação massa/volume

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo pode ser considerado como um sistema natural disperso, composto de três fases distintas: sólida, liquida e gasosa. A fase sólida, pouco variável, geralmente é predominante, tendo sua constituição formada por uma

parte orgânica e outra mineral, enquanto que as fases líqüida e gasosa correspondem ao sistema poroso do solo. A primeira, fase líquida, constituída de solvente/solutos, encontra-se retida no solo sob diferentes tensões, ao passo que a segunda, gasosa, é constituída do ar do solo, provenientes da atmosfera e das reações processadas no sistema água-solo-planta-atmosfera. Assim, o solo agrícola ideal tem sido referido como aquele que apresenta cerca de 50% de porosidade total (sendo 0,335 e 0,165 $m^3/m^3$ respectivamente correspondente à microporosidade e macroporosidade) e 50% de volume sólido (sendo 0,450 $m^3/m^3$ correspondente à parte mineral e 0,050 $m^3/m^3$ à parte orgânica) (BAVER et al., 1973; MEDINA, 1975b; KIEHL, 1979).

## 2.3. Principais atributos físicos do solo diretamente implicados com sua relação massa/volume

### 2.3.1. Resistência mecânica à penetração e umidade

A resistência à penetração é um dos atributos físicos mais adotados como indicativo da compactação do solo. Apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (FREDDI et al., 2006). Fisicamente estabelecida pela pressão, ela é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma base metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitantemente à da umidade do solo, uma vez que eles variam de forma inversamente proporcional. Por outro lado, a referida resistência varia positivamente com a densidade do solo (ORLANDO et al., 1998; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; SOUZA et al., 2001).

A resistência mecânica à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido e, de certa forma, de ser correlacionado com a macroporosidade e a densidade do solo. Ela é mais afetada pela variação da umidade do solo no momento da amostragem do que pela sua densidade. Por esta razão, muitos trabalhos, que objetivaram caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e sobre a produtividade das culturas, utilizaram a densidade do solo como parâmetro de auxiliar à referida resistência (TORRES; SARAIVA, 1999). De acordo com Genro Júnior et al. (2004), a resistência à penetração geralmente aumenta com a compactação do solo devido ao concomitante incremento da densidade, assim como com o decréscimo da umidade. Seu aumento é indesejável para o crescimento das plantas por causar redução do crescimento radicular. Desta forma, pesquisas envolvendo a determinação da resistência mecânica do solo à penetração vêm demonstrado

influência positiva na definição do manejo ideal do solo e também sobre a produtividade vegetal (SOUZA; ALVES, 2003; FREDDI et. al., 2006; SOUZA et. al., 2001).

Os níveis críticos de resistência mecânica 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 (solo friável/macio), a maioria dos trabalhos adota a seguinte classificação de resistência à penetração (RP), estabelecida por Arshad et al. (1996): a) extremamente baixa: RP < 0,01 MPa; b) muito baixa: 0,01 ≤ RP < 0,1 MPa; c) baixa: 0,1 ≤ RP < 1,0 MPa; d) moderada: 1,0 ≤ RP < 2,0 MPa; e) alta: 2,0 ≤ RP < 4,0 MPa; f) muito alta: 4,0 ≤ RP < 8,0 MPa e g) extremamente alta: RP > 8,0 MPa.

### 2.3.2. Densidade do solo

A densidade do solo, também conhecida como densidade aparente ou densidade global, por definição é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca em estufa, a 110ºC, e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e os poros, dada em g/cm³, kg/dm³, t/m³ e Mg/m³. Ela possui estreita relação com outros atributos do solo, tais como a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica e a resistência à penetração, os quais são de suma importância para o desenvolvimento da planta (KIEHL, 1979; CAMARGO; ALLEONI, 1997; CARVALHO et al., 1999; FOLONI et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; SECCO et al., 2005; MELLO FILHO et al., 2006; MENDES et al., 2006).

A densidade do solo é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, sendo muito utilizada como indicadora de sua estrutura e dureza. Desta forma, alterações dos seus valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade e a porosidade total (DORAN et al., 1994).

Segundo Kochhann et al. (2000), a compactação do solo é entendida como o aumento da sua densidade, resultante da complexa interação entre os processos físicos, químicos e biológicos diretamente relacionados com sua massa/volume. Ela é variável num mesmo tipo solo, alterando-se, espacial e volumetricamente, conforme a variação da estrutura e da textura. Também, tende a aumentar com a profundidade do perfil, sobretudo pela diminuição do teor de matéria orgânica. Desta forma, foram relatados valores gerais desse atributo variando entre 1,40 a 1,80 kg/dm$^3$. Por outro lado, nos solos de textura arenosa seus valores 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). Por

outro lado, em relação aos níveis críticos da densidade do solo, Bowen (1981) considerou que valores em torno de 1,55 kg/ $dm^3$ para solos franco-argilosos e argilosos, e de 1,85 kg/$dm^3$ para solos arenosos, podem afetar o crescimento das raízes e conseqüentemente a produtividade vegetal.

A compactação do solo é resultado do processo físico exercido pela ação das forças mecânicas causadas pelo tráfego de máquinas por ocasião do preparo, semeadura, tratos culturais, colheita e transporte, pisoteio animal em áreas de pastejo, especialmente nos solos argilosos úmidos. Tais forças aproximam as partículas unitárias do solo, expulsando o ar e a água do seu interior. Desta forma, ocorre a redução do seu volume total, por diminuir drasticamente a macroporosidade e aumentar levemente a microporosidade. Conseqüentemente há um aumento tanto da densidade global como da resistência à penetração, assim como uma diminuição da taxa de infiltração (HAKANSSON et al., 1998; TREIN et al., 1991; SOANE; OUWERKERK, 1994; KOCHHANN et al., 2000).

Trabalhos envolvendo a densidade do solo evidenciaram grande importância deste atributo para os estudos agronômicos, assim como uma estreita relação com outros atributos, permitindo avaliar que com o seu aumento ocorre a diminuição da macroporosidade, condutividade hidráulica, difusividade do ar, absorção iônica, e conseqüentemente o aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo, o que poderia contribuir para a diminuição da produtividade agrícola (CARVALHO et al., 1999; GOEDERT et al., 2002; FOLONI et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; SECCO et al., 2005; MELLO FILHO et al., 2006; MENDES et al., 2006).

### 2.3.3. Porosidade do solo

Definida como sendo a porção do volume do solo não ocupada por partículas sólidas, depende principalmente da textura e estrutura, sendo considerada ideal quando ocupar 50% do volume do solo. Sua caracterização é importante para a adoção de medidas de manejo, pois está estreitamente ligada à dinâmica de armazenamento e movimento da água e dos solutos e da circulação do ar no solo. Assim, o espaço poroso do solo regula as relações entre a fase sólida, liquida e gasosa. (HENIN et al., 1976; BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979; EPSTEIN;, BLOON, 2006).

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 agronômico, 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, são considerados valores ideais para a macroporosidade e a microporosidade quando apresentarem respectivamente 0,17 m³/m³ e 0,33 m³/m³ do volume total do solo. Por outro lado, valores de macroporosidade menores do que 0,10 m³/m³ podem afetar o desenvolvimento das raízes, a ponto de comprometer a produtividade vegetal (KIEHL, 1979).

A porosidade do solo vem sendo muito utilizada nos estudos de correlação com outros atributos pertencentes à relação massa/volume, como por exemplo, a densidade do solo e resistência à penetração, apresentando considerável afinidade com estes (CARVALHO et al., 2002, 2003; SOUZA et al., 2004; GREGO; VIEIRA, 2005; SECCO et al., 2005). Por outro lado, na prática o espaço poroso tende a ser menor nos solos arenosos do que nos argilosos, indicando valores respectivamente entre 0,35-0,50 m³/m³ e 0,40-0,60 m³/m³. Porém, dependendo da classe granulométrica, o solo pode apresentar uma porosidade total mínima de 0,30 m³/m³ e máxima de 0,80 m³/m³ (ROBINSON, 1960; BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979; RESENDE et al., 2002; REICHARDT; TIMM, 2004).

### 2.4. Conceitos básicos necessários à geoestatística

As diversas interações entre variáveis do solo fazem com que a variabilidade espacial, horizontal e/ou vertical, seja algo inquestionável. Assim, quando uma determinada propriedade do solo varia de um local para outro, obedecendo algum grau de organização, expressa pela dependência espacial, sai de cena a chamada estatística clássica, que supõe que as variáveis aleatórias são independentes entre si, passando tal condição a ser priorizada como objeto de estudo da geoestatística (ZASLAVSKY; ROGOWSKI, 1969; UGOLINI; EDMONDS, 1983; TRANGMAR et al., 1985; PONTES, 2002).

De acordo com Ribeiro Júnior (1995), a geoestatística aparece como um grupo de procedimento estatístico aplicável a alguns problemas onde os dados são espacialmente referenciados. Ela surgiu na África do Sul, quando Krige (1951) concluiu, por meio de dados de concentração de ouro, que só conseguiria encontrar sentido nas variâncias entre eles se fossem levadas em consideração às distâncias entre suas amostras. Tal fato constituiu-se na base da ***teoria das variáveis regionalizadas***, que ficou definida como uma função espacial numérica, variável de um local para outro, com uma continuidade aparente (dependência espacial), onde a variação não pode ser representada por uma função matemática simples

(MATHERON, 1963). A geoestatística vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros de interesse em ciências agrárias, permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, considerando a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem, principalmente da interação entre os atributos físicos do solo e a produtividade das culturas (LIBARDI et al., 1986; PREVEDELLO, 1987; CARVALHO, 1991; ARAÚJO, 2002).

Na geoestatística, a dependência espacial apresentada pelos dados pode ser estimada pelo semivariograma, pressuposto da estacionaridade inerente à hipótese intrínseca, que é a representação gráfica do ajuste de modelos matemáticos aos dados observados. Por outro lado, o semivariograma cruzado é a representação gráfica da dependência espacial existente entre duas variáveis (primária e secundária) que apresentem correlação espacial entre si (RIBEIRO JUNIOR, 1995; SOUZA et al., 1997; CARVALHO et al., 1998; ZIMBACK;CATANEO, 1998; VIEIRA, 2000). De acordo com o modelo teórico do $GS^+$ (2004), o semivariograma apresenta como parâmetros principais: o **efeito pepita** ($C_o$), o **patamar** ($C_O$+C), a **variância estrutural** (C), e o **alcance** ($A_o$), os quais são apresentados na figura 1.

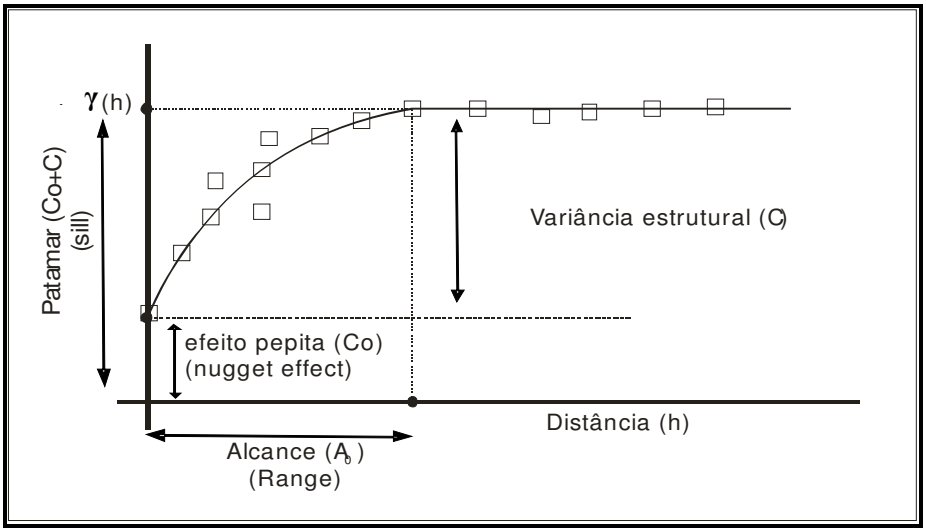


Figura 1: Modelo de semivariograma experimental e teórico.

O **efeito pepita** refere-se ao erro ou à variabilidade não explicada. Ele mede duas parcelas da variabilidade total: a) a de uma pequena escala não abrangida pela malha de amostragem; e b) a da variabilidade à escala da amostra, induzida por erros não sistemáticos de amostragem. Quando o efeito pepita apresentar valor constante e igual ao patamar, tem-se

o chamado **efeito pepita puro,** que representa a dependência espacial nula, não podendo os dados ser analisados pela geoestatística. Neste caso, a dependência espacial, se existir, só será manifestada à distância menor do que o menor espaçamento entre as amostras (SOARES, 2000; PONTES, 2002; GUIMARÃES, 2004).

O **patamar** é o ponto onde a semivariância da amostra se estabiliza e passa a ser constante. Ele representa a variância da variável aleatória, correspondendo à variância dos dados da estatística convencional. Por outro lado, a identificação da **variância estrutural** representa a diferença entre o nível definido pela semivariância inicial (efeito pepita) e pelo patamar. Diferentemente do efeito pepita (erro), a variância estrutural corresponde ao acerto. Já ao **alcance** refere-se à distância alcançada pelo patamar, demonstrando, no geral, o limite de grandeza da dependência espacial do atributo. Ele representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si, por meio da dependência espacial. Assim, medidas localizadas em distâncias maiores do que o alcance tem distribuição aleatória no espaço, sendo independentes entre si (TRANGMAR et al., 1985; VIEIRA, 2000; PONTES, 2002; RODRIGUES, 2002; SCHAFFRAT, 2006).

A variabilidade espacial pode ser representada por mapas, confeccionados a partir de estimativas efetuadas à variável estudada por meio da interpolação por krigagem, ou a partir de estimativas de duas variáveis que se correlacionem (primária e secundária) por meio da interpolação por cokrigagem. Elas podem ser descritas como técnicas que minimizam a variância estimada por meio de análise de regressão, levando-se em conta a dependência entre os dados distribuídos no espaço. Essas técnicas de montagem são embasadas em estimadores de variáveis regionalizadas, envolvendo estimação de pontos, ou áreas, e assumindo que as amostras são normalmente distribuídas e estacionadas. Desta forma, são capazes de prever o comportamento do fenômeno em estudo (TRAGMAR et al., 1985; RIBEIRO JÚNIOR, 1995; TAKEDA, 2000). Assim, as interpolações por krigagem e por cokrigagem estão fortemente associadas aos modelos de semivariogramas ajustados, que podem ser avaliados por meio da validação cruzada. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado por meio da krigagem como se não existisse. Portanto, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* valores observados, para todos os pontos. Do conjunto de duplas (valores estimados e valores observados) de todas as amostras, calculam-se dados estatísticos básicos (média, variância dos desvios), com o objetivo de aferir a qualidade do modelo escolhido para o semivariograma (SOARES, 2000).

O coeficiente de correlação (r) da validação cruzada representa uma medida da eficiência do ajuste, dado pela técnica da *soma dos quadrados dos desvios*, representando a

equação de regressão linear. Um ajuste perfeito teria um coeficiente de regressão igual a um e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a um. ($GS^+$, 2004).

### 2.4.1. Variabilidade da produtividade do milho e dos atributos da relação massa/volume do solo

De acordo com Pimentel-Gomez; Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada conforme a magnitude do seu coeficiente de variação (CV). Assim suas classes foram de $0\% < CV \leq 10\%$ (baixo), $10\% < CV \leq 20\%$ (médio), $20\% < CV \leq 30\%$ (alto) e $CV > 30\%$ (muito alto). Assim, para a produtividade da massa seca da forragem do milho têm sido relatadas baixas e médias variabilidades, com coeficientes de variação entre 6,0 a 17,5% (NUSSIO, 1991; BORGHI, 2001; LIMA, 2005).

Os estudos envolvendo atributos físicos do solo têm mostrado diferentes grandezas dos coeficientes de variação. Desta forma, para a resistência mecânica à penetração tem sido relatada uma elástica variabilidade, entre baixa e muito alta, com coeficientes de variação entre 7,0 e 71,0 % . Contudo, uma vez que a umidade gravimétrica é tida como variável de controle da referida resistência, ela tem sido descrita com variabilidade entre baixa e média, com coeficientes de variação entre 3,9 e 15,0 % (IMHOFF et al., 2000; SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002; ABREU et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; JOHANN et al., 2004; GREGO; VIEIRA, 2005; FREDDI et al., 2006). Já a variabilidade dos dados de densidade do solo tem sido relatada entre baixa e média. No primeiro caso, com coeficientes de variação entre 1,8 e 9,9 % (MACEDO et al., 1998; COELHO FILHO et al., 2001; IMHOFF et al., 2000; SOUZA et al., 2001, 2004, CARVALHO et al., 2002; 2003; MESQUITA et al., 2003; JOHANN et al., 2004; SECCO et al., 2005; MELO FILHO et al., 2006; SANTOS et al., 2006); ao passo que no segundo, com coeficientes de variação entre 10,3 e 19,4 % (GREGO; VIEIRA, 2005).

O comportamento da variabilidade da macroporosidade, microporosidade e da porosidade total do solo também tem se apresentado de forma elástica. Assim, para a macroporosidade ela tem sido relatada entre média a muito alta, com coeficientes de variação de 12,6 a 43,8% (QUEIROZ et al., 1999; SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; MESQUITA et al., 2003; MILANI et al., 2005; SECCO et al., 2005). No entanto, para a microporosidade e a porosidade total, ela tem se comportado entre baixa e média, com coeficientes de variação ficando abaixo de 20% (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et

al., 2002, 2003; MESQUITA et al., 2003; MILANI et al., 2005; SECCO et al., 2005; SANTOS et al., 2006).

### 2.4.2. Variabilidade espacial da produtividade do milho e dos atributos da relação massa/volume do solo

A produtividade de grãos de milho, quando estudada sob a ótica da variabilidade espacial, não é tão facilmente encontrada na literatura. Já com relação à produtividade de massa seca da forragem de milho não existe praticamente nada publicado. Desta forma, para a produtividade de grãos tem sido ajustados semivariogramas do tipo esférico e exponencial, com alcances da dependência espacial, entre 4,5 e 65,0 m (SILVA et al., 2003; VIEIRA e GONZALEZ, 2003; VERONESE JÚNIOR, 2004; SANTOS et al., 2006).

O estudo da variabilidade espacial da resistência à penetração tem modelado, com freqüências iguais, semivariogramas do tipo esférico (42%), exponencial (42%) e gaussiano (16%) para esse atributo, cujo alcance tem variado entre 8,8 e 85,7 m (SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002; ABREU et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; JOHANN et al., 2004; GREGO; VIEIRA, 2005; FREDDI et al., 2006). Para a umidade gravimétrica, o modelo de maior freqüência tem sido esférico (67%), seguido pelo exponencial e o gaussiano, com 17% cada, com alcances da dependência espacial entre 8,3 e 140,0 m (SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002; JOHANN et al., 2004; GREGO; VIEIRA, 2005; FREDDI et al., 2006). Já para a densidade do solo, os modelos ajustados têm sido o esférico (86%) e o exponencial (14%), com alcances entre 4,3 e 126,0 m (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; JOHANN et al., 2004; SANTOS et al., 2006).

A macroporosidade do solo tem apresentado, com elevada freqüência, semivariogramas do tipo esférico (86%), seguido do exponencial (14%), com alcances entre 2,7 e 36,8 m (QUEIROZ et al., 1999; SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; MILANI et al., 2005). Por outro lado, a microporosidade do solo tem revelado semivariogramas do tipo esférico (83%) e exponencial (17%), com alcances entre 2,5 e 36,9 m (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; MILANI et al., 2005). Finalmente, a porosidade total do solo tem se apresentado com semivariogramas do tipo esférico (43%), exponencial (29%) e gaussiano (28%), com alcances entre 3,9 e 80,0 m (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; MILANI et al., 2005).

# 3. MATERIAL E MÉTODOS

## 3.1. Caracterização do local de origem dos dados experimentais

O experimento foi conduzido em 2005, em uma área irrigada por pivô central e manejada no sistema de integração agricultura-pecuária, ocupada com *Brachiaria brizantha* cv Marandu, utilizada há seis anos como pastagem irrigada no método rotacionado intensivo. A área localiza-se na Fazenda Bonança, pertencente à Agropecuária Damha, no município de Pereira Barreto, Estado de São Paulo, Brasil, latitude 20º40'12"S e longitude 51º 01' 50" W, com precipitação e temperatura médias anuais respectivamente de 1300 mm e 24,1ºC. O tipo climático local é o $A_w$, segundo classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo [(1)] representativo da área estudada, classificado conforme EMBRAPA (2006), foi um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico franco-arenoso, álico, epicompactado, fortemente ácido, cujos dados analíticos físicos e químicos se encontram no Quadro 1.

## 3.2. Implantação e condução da cultura do milho

Para implantação do ensaio a pastagem foi dessecada em 20/01/05 com o herbicida Glyphosate na dosagem de 1,8 kg/ha (p.a.).

A planta teste trabalhada foi o milho *safrinha* outonal (*Zea mays* L.) (Figura 2), com a finalidade de produção de forragem destinada à alimentação bovina. Seguiram-se as instruções agrícolas para as principais culturas do Estado de São Paulo (FAHL et al., 1998), tomando-se por base a análise química inicial da fertilidade do solo para fins de rotina, realizada em 03/02/05. (Quadro 1). O milho utilizado foi o híbrido simples P30F80, cuja semeadura foi realizada no dia 10/02/05, no sistema plantio direto sobre a pastagem dessecada.

---

[(1)] CARVALHO, M. P. Comunicação pessoal. 2007. (Depto. de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – Faculdade de Engenharia-UNESP, Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil).

Quadro 1: Cor, análise granulométrica e química de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| Profundidade | Cor | | Composição granulométrica | | | Relação silte/argila | Analise química | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | seco | úmido | areia | silte | argila | | pH | | |
| m | | | ……..g/kg..... | | | - | $CaCl_2$ | KCl | $H_2O$ |
| **0 - 0,20** | 2,5YR 4/4 | 2,5YR 3/3 | 814 | 76 | 110 | 0,690 | 5,6 | 5,2 | 6,5 |
| **0,20 - 0,40** | 2,5YR 4/6 | 2,5YR 3/4 | 774 | 81 | 145 | 0,559 | 4,4 | 4,1 | 5,6 |
| **0,40 - 0,60** | 2,5YR 4/8 | 2,5YR 3/6 | 739 | 89 | 172 | 0,517 | 4,3 | 4,0 | 5,1 |
| **0,60 - 0,80** | 2,5YR 4/8 | 2,5YR 3/6 | 724 | 91 | 185 | 0,492 | 4,2 | 4,0 | 4,8 |
| **0,80 - 1,00** | 2,5YR 4/8 | 2,5YR 3/6 | 722 | 91 | 187 | 0,487 | 4,3 | 4,1 | 4,9 |
| **1,00 - 1,20** | 2,5YR 4/8 | 2,5YR 3/6 | 708 | 97 | 195 | 0,498 | 4,4 | 4,3 | 4,9 |

| Profundidade | Análise química | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ΔpH | P | MO | $K^+$ | $Ca^{+2}$ | $Mg^{+2}$ | $H^++Al^{+3}$ | $Al^{+3}$ | SB | CTC | V% | m% |
| M | - | $mg/dm^3$ | $g/dm^3$ | .....$mmol_c/dm^3$..... | | | | | | | -% | %- |
| **0 - 0,20** | -1,3 | 6 | 18 | 1,4 | 15 | 9 | 16 | 0 | 25,4 | 41,4 | 61 | 0 |
| **0,20 - 0,40** | -1,5 | 1 | 11 | 1,2 | 6 | 4 | 26 | 3 | 11,2 | 37,2 | 30 | 21 |
| **0,40 - 0,60** | -1,1 | 1 | 9 | 0,6 | 5 | 2 | 26 | 5 | 7,6 | 33,6 | 23 | 40 |
| **0,60 - 0,80** | -0,8 | 1 | 7 | 0,2 | 4 | 2 | 25 | 6 | 6,2 | 31,2 | 20 | 49 |
| **0,80 - 1,00** | -0,8 | 1 | 5 | 0,2 | 3 | 3 | 22 | 5 | 6,2 | 28,2 | 22 | 45 |
| **1,00 - 1,20** | -0,6 | 1 | 5 | 0,3 | 2 | 1 | 20 | 4 | 3,3 | 23,3 | 14 | 55 |

Figura 2: Vista geral da cultura do milho ao final do crescimento (29/04/05).

O espaçamento utilizado entre linhas foi de 0,85 m, com uma densidade de 5,5 sementes por metro de linha de semeadura. Na adubação de semeadura foram utilizados 320 kg/ha da fórmula

08-28-16. A adubação de cobertura foi realizada por fertirrigação com duas aplicações de 106 kg de uréia, sendo uma em 28/02/05 e a outra em 16/03/05, assim como uma aplicação de cloreto de potássio, na dosagem de 150 kg/ha em 03/03/2005.

### 3.3. Implantação e caracterização da malha experimental

Foram definidas as direções dos eixos cartesianos da malha geoestatística experimental (Figura 3), numa área entre dois terraços agrícolas. Assim, o eixo *x* foi estabelecido em nível enquanto que o *y* ficou no sentido do declive. Tal malha ficou constituída com um total de 125 pontos amostrais, distribuídos numa área de 2500m$^2$ (50 m x 50 m), com declividade média de 0,025 m/m. Para o estaqueamento dos pontos amostrais da malha experimental foi utilizado um teodolito.

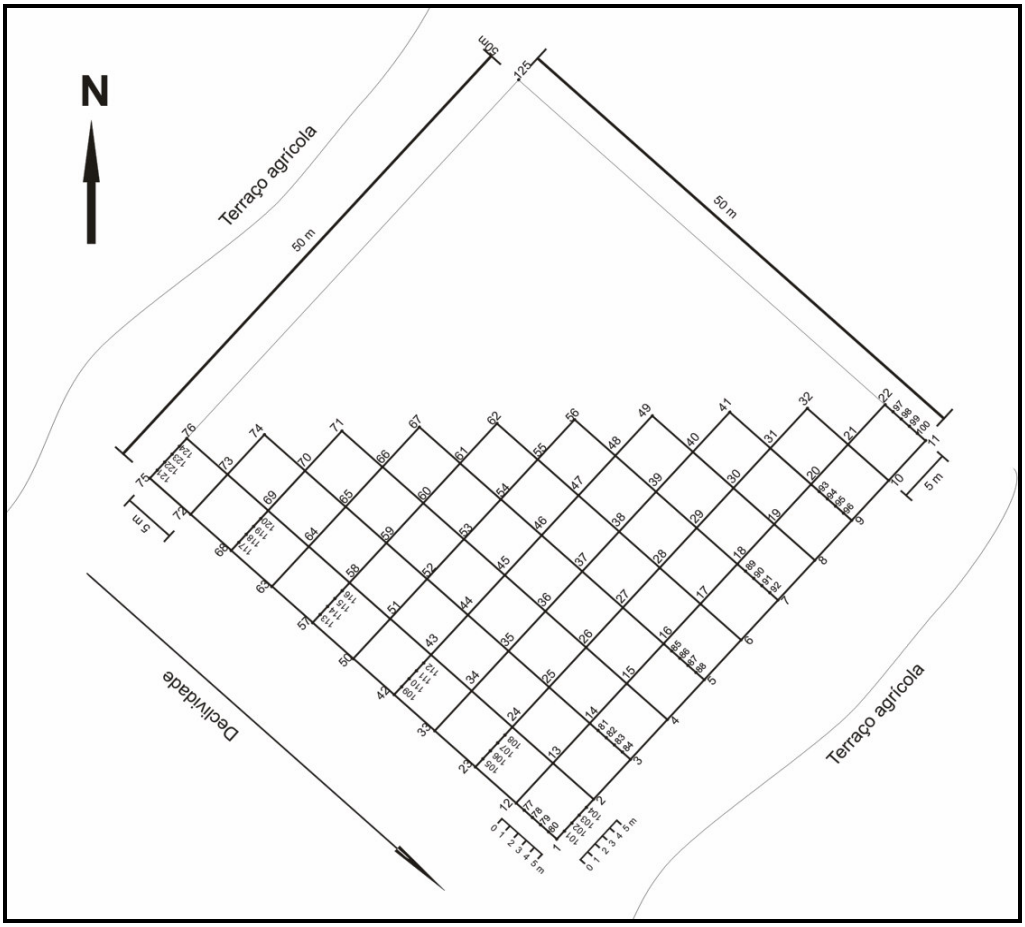


Figura 3: Esquema da malha experimental alocada na Fazenda Bonança, município de Pereira Barreto (SP).

O espaçamento utilizado entre os pontos amostrais da grande malha foi de 5 m, enquanto que na de refinamento foi de 1 m. Essa última foi estabelecida com a finalidade de

detectar alcances da dependência espacial para condições de espaçamentos menores do que os da grande malha. Desta forma, as áreas úteis utilizadas para a coleta de dados, tanto do solo quanto da planta, ficaram estabelecidas, no entorno de cada ponto amostral, da seguinte forma: a) na grande malha, com 3,40 m de largura (4 linhas de semeadura) por 3,40 m de comprimento no sentido da linha, numa área de 11,56 $m^2$, e b) na de refinamento disposta no eixo *x*, com 2,55 m de comprimento (3 linhas de semeadura) por 1,00 m de largura no sentido da linha, numa área de 2,55 $m^2$, e no eixo *y,* com 1,70 m de comprimento (2 linhas de semeadura) por 1,50 m de largura no sentido da linha, numa área de 2,55 $m^2$.

### 3.4. Coleta e análise dos atributos da planta

Os atributos da planta coletados no campo, cujo estágio fenológico se encontrava entre o R4 e o R5 (grão pastoso no ponto de ensilagem), foram a altura das plantas (ALT), a altura de inserção da primeira espiga (AME), o diâmetro médio basal do colmo (DMC), coletados em 27/04/2005, e a produtividade da massa verde de milho destinado para forragem (MSF), coletada em 30/04/05.

A ALT consistiu no valor médio da altura de 10 plantas ao acaso dentro da área útil de cada ponto amostral. Da mesma forma, a AME consistiu na média obtida da altura de inserção da primeira espiga das 10 plantas, selecionadas ao acaso dentro da área útil de cada ponto amostral. O DMC foi representado pela média do diâmetro do colmo na altura de corte, para cinco plantas, as quais foram coletadas aleatoriamente dentro da área útil de cada ponto amostral.

A produtividade de massa verde foi obtida conforme o seguinte procedimento. Foram coletadas todas as plantas da área útil de cada ponto amostral, por meio de corte a aproximadamente 0,30 m de altura do solo, efetuando-se a pesagem para o conhecimento da massa úmida total de cada ponto amostral. Os tamanhos das áreas úteis, de cada ponto amostral (**AP**), corresponderam a 2,55 $m^2$ (malha fina) e 11,56 $m^2$ (grande malha). Posteriormente, para obtenção dos valores de massa seca da forragem (**MSF**), utilizou-se um fator de correção (**FC**), o qual representou a relação massa seca/verde para cada ponto amostral, sendo obtido da seguinte forma: foram trituradas 10 plantas escolhidas aleatoriamente dentre todas as coletadas em cada área útil do ponto amostral. Assim, retirou-se uma pequena amostra a qual foi imediatamente pesada (massa verde). Posteriormente, o material foi devidamente acondicionado em sacos de papel e levado para o laboratório, onde foi posto em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C por 72 horas até atingir massa constante, sendo novamente pesado (massa seca).

Portanto, a expressão que calculou o atributo trabalhado da planta (MSF), individualmente para cada ponto amostral, foi dada por:

$$\mathbf{MSF = (MU/AP) \cdot FC \cdot 10^4} \qquad \mathbf{(1)}$$

onde: **MSF** representou a produtividade de massa seca da forragem num determinado ponto amostral (kg/ha); **MU** representou a massa úmida total das plantas contidas na área designada por tal ponto (kg); **AP** representou a área útil do ponto amostral ($m^2$); **FC** representou o fator de correção da produtividade de massa verde para a produtividade de massa seca da forragem contida no determinado ponto e $\mathbf{10^4}$ foi o fator de conversão de $kg/m^2$ para kg/ha.

### 3.5. Coleta e metodologia de determinação dos atributos do solo

Os atributos avaliados foram a resistência à penetração (RP) em MPa, umidade gravimétrica (UG) em kg/kg, densidade global do solo (DS) em $kg/dm^3$, macroporosidade (MA) em $m^3/m^3$, microporosidade (MI) em $m^3/m^3$ e a porosidade total (PT) em $m^3/m^3$. Junto a cada um dos 125 pontos da malha, foram tomadas amostras do solo, deformadas para UG e indeformadas para as demais, individualmente coletadas nas profundidades 1 (0-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m). Assim, foram coletados os seguintes atributos do solo: a) na profundidade 1: RP1, UG1, DS1, MA1, MI1 e PT1, b) na profundidade 2: RP2, UG2, DS2, MA2, MI2 e PT2 e c) na profundidade 3: RP3, UG3, DS3, MA3, MI3 e PT3. Também foram considerados como atributos os valores médios entre as três profundidades do solo, a saber: RPM, UGM, DSM, MAM, MIM e PTM. Portanto, o total de atributos estudados do solo foi de 24.

Os atributos do solo foram coletados em 14/05/05, quando o solo encontrava-se friável e macio, sendo posteriormente processados no Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP). A resistência à penetração e a umidade gravimétrica foram coletadas concomitantemente. Para a resistência foi utilizado o penetrógrafo $PTSC^{-60}$, enquanto que para a umidade foi utilizado um trado de caneca, cujo volume da amostra deformada foi de $4{,}05.10^{-4}$ $m^3$. A densidade global, macroporosidade, microporosidade e a porosidade total do solo foram originadas de amostras indeformadas, coletadas em anéis volumétricos com capacidade de $10^{-4}$ $m^3$. Para a primeira foi utilizado o método do anel volumétrico, assim como para as demais, o método da mesa de tensão, conforme EMBRAPA (1997).

### 3.6. Análise estatística dos dados

A análise estatística dos atributos estudados, realizada no Departamento de Fitossanidade,

Engenharia Rural e Solos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP) consistiu da análise descritiva, análise de regressão e análise geoestatística.

### 3.6.1. Análise descritiva dos dados

Com a utilização do software estatístico SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), foram calculadas a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, o desvio padrão, o coeficiente de variação, curtose e assimetria, assim como efetuada a análise de distribuição de freqüência dos dados. Posteriormente, realizou-se a identificação de *outliers*, de acordo com o gráfico de ramos e folhas. Desta forma, efetuou-se a substituição desses valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha geoestatística, apresentada na Figura 3.

Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade dos atributos (ATR), realizou-se o teste de Shapiro; Wilk (1965) a 1% de probabilidade. De acordo com o referido teste, a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser amostra proveniente de uma população com distribuição normal. No caso de dados transformados na forma logarítmica (y = log ATR), W testa a hipótese nula de que os valores $y_i$ provêm de uma distribuição normal, ou seja, os dados não transformados ($ATR_i$) ajustam-se a uma distribuição lognormal. Porém, no quadro de análise descritiva inicial dos atributos, os valores da média, da mediana, do mínimo e do máximo foram retrotransformados pelo uso de $ATR=10^{(\log ATR)}$. Atributos sucedidos das letras **a, b** e **c** tiveram seus valores representados pelos logaritmos decimais, respectivamente multiplicados por 1, 10 e 100, com o objetivo de que, após anamorfose, seus dados não resultassem valores menores do que um.

### 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; portanto, aqueles que poderiam apresentar semivariograma cruzado e a conseqüente cokrigagem. Também, conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, foi efetuada a regressão linear múltipla entre a variável dependente da planta e as independentes do solo (atributos do solo), objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo aumento do coeficiente de determinação ($r^2$). Para tanto, por intermédio do *step wise*, foi utilizado o 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 Software* ($GS^+$, 2004). Foram ajustados semivariogramas simples a todos os atributos estudados, da planta (MSF, AME, ALT e DMC) e do solo (RP1, RP2, RP3, RPM, UG1, UG2, UG3, UGM, DS1, DS2, DS3, DSM, MA1, MA2, MA3, MAM, MI1, MI2, MI3, MIM, PT1, PT2, PT3 e PTM). Posteriormente, ajustaram-se semivariogramas cruzados entre os atributos: a) planta x planta, b) planta x solo, e c) solo x solo. O objetivo foi definir os pares de melhor representatividade, isto é, qual atributo, tido como variável secundária apresentou melhor correlação espacial explicativa do atributo tido como variável primária. 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 (**RSS**); b) o maior coeficiente de determinação (**$r^2$**) e c) o maior avaliador da dependência espacial (**ADE**). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor rede de krigagem e/ou de cokrigagem. 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 (GS+, 2004):

$$\mathbf{ADE = [C/(C+Co)] \,.\, 100} \qquad \textbf{(2)}$$

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

Na interpretação dos mapas de krigagem dos atributos que resultaram em distribuição lognormal, cuja legenda de valores mapeados apresentou o logaritmo dos dados originais, efetivou-se a retrotransformação deles pela seguinte expressão (DEUTSCH; JOURNEL, 1997):

$$Z^*(x) = 10^{\left[Y^*(x) + \frac{\sigma_k^{2\,(x)}}{2}\right]} \qquad \textbf{(3)}$$

onde: Z*(x) é o valor retrotransformado da variável normalizada, Y*(x) é o valor krigado do logaritmo da variável e $\frac{\sigma_k^{2\,(x)}}{2}$ é a variância amostral da krigagem do logaritmo da variável.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. Análise descritiva dos dados

### 4.1.1. Variabilidade dos dados dos atributos estudados

#### 4.1.1.1. Atributos da planta

No Quadro 2 está apresentada a análise descritiva dos dados referente aos atributos estudados. Em relação aos da planta, a produtividade de massa seca da forragem do milho (MSF) e a altura de inserção da primeira espiga (AMEa) apresentaram média variabilidade, respectivamente com coeficientes de variação de 16,3 e 12,9%. Assim, os dados da MSF de milho ficaram em desacordo com os de Lima (2005), que os apresentaram com baixa variabilidade, como também, de acordo com os de Nussio (1991), que os apresentaram com média variabilidade. Já os dados da AMEa ficaram em discordância com os de Kuramoto (1999), Lima (2005) e Freddi (2007), nos quais foram de baixa variabilidade. Por outro lado, a altura da planta (ALT) e o diâmetro do colmo (DMC) tiveram uma baixa variabilidade, respectivamente de 3,4 e 5,1%, ficando tais dados em plena concordância com aqueles de Kuramoto (1999), Lima (2005) e Freddi (2007).

#### 4.1.1.2. Atributos do solo

A variabilidade dos dados da MA foi muito alta em todas as camadas, concordando com as pesquisas de Queiroz et al. (1999), Souza et al. (2001, 2004), Carvalho et al. (2002, 2003), Mesquita et al. (2003), Milani et al. (2005) e Secco et al. (2005). Contudo, foi alta no valor médio delas (MAM). Por outro lado, a variabilidade dos dados da MI, PT e da DS foi baixa em todos os casos, com exceção apenas da MI1 e da PT1, nas quais ela foi média. Tais fatos ficaram perfeitamente de acordo com Macedo et al. (1998), Imhoff et al. (2000), Souza et al. (2001, 2004), Carvalho et al. (2002, 2003), Mesquita et al. (2003), Johann et al. (2004), Souza et al. (2001, 2004), Grego ; Vieira (2005), Milani et al. (2005), Secco et al. (2005), Melo

Quadro 2: Análise descritiva de alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| Atributo [a] | Medidas estatísticas descritivas | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Média | Mediana | Valor | | Desvio Padrão | Coeficiente | | | Probabilidade do teste[b] | |
| | | | Mínimo | Máximo | | Variação (%) | Curtose | Assimetria | Pr<W | DF |
| **MSF (kg/ha)** | 14841 | 15049 | 8949 | 23198 | 2424 | 16,3 | 0,615 | 0,008 | 0,369 | NO |
| **AMEa (m)[c]** | 1,446 | 1,439 | 1,321 | 1,641 | 0,021 | 12,9 | -0,489 | 0,353 | 0,029 | TL |
| **ALT (m)** | 2,703 | 2,690 | 2,470 | 2,920 | 0,093 | 3,4 | -0,272 | -0,023 | 0,556 | NO |
| **DMC (cm)** | 2,490 | 2,498 | 2,132 | 2,808 | 0,126 | 5,1 | 0,293 | -0,345 | 0,333 | NO |
| **MA1 ($m^3/m^3$)** | 0,123 | 0,098 | 0,017 | 0,339 | 0,078 | 63,0 | -0,458 | 0,672 | 1,0.10 | IN |
| **MA2 ($m^3/m^3$)** | 0,040 | 0,039 | 0,003 | 0,088 | 0,017 | 41,7 | -0,125 | 0,487 | 0,033 | TN |
| **MA3 ($m^3/m^3$)** | 0,046 | 0,044 | 0,003 | 0,095 | 0,017 | 37,9 | 0,730 | 0,179 | 0,008 | IN |
| **MAMc ($m^3/m^3$)[c]** | 0,063 | 0,063 | 0,026 | 0,151 | 0,195 | 24,3 | -0,800 | -0,062 | 0,053 | LN |
| **MI1 ($m^3/m^3$)** | 0,244 | 0,245 | 0,158 | 0,313 | 0,031 | 12,7 | -0,005 | -0,298 | 0,421 | NO |
| **MI2 ($m^3/m^3$)** | 0,250 | 0,252 | 0,187 | 0,316 | 0,020 | 8,0 | 0,979 | -0,056 | 0,335 | NO |
| **MI3 ($m^3/m^3$)** | 0,253 | 0,254 | 0,206 | 0,286 | 0,016 | 6,4 | 0,376 | -0,451 | 0,050 | NO |
| **MIM ($m^3/m^3$)** | 0,249 | 0,252 | 0,201 | 0,283 | 0,018 | 7,3 | 0,179 | -0,715 | 5,0.10 | IN |
| **PT1 ($m^3/m^3$)** | 0,367 | 0,354 | 0,254 | 0,530 | 0,063 | 17,1 | -0,656 | 0,544 | 1,0.10 | IN |
| **PT2 ($m^3/m^3$)** | 0,291 | 0,289 | 0,254 | 0,334 | 0,016 | 5,6 | 0,183 | 0,425 | 0,104 | NO |
| **PT3 ($m^3/m^3$)** | 0,299 | 0,300 | 0,241 | 0,341 | 0,020 | 6,6 | 0,165 | -0,441 | 0,092 | NO |
| **PTMb ($m^3/m^3$)[c]** | 0,318 | 0,313 | 0,274 | 0,375 | 0,029 | 5,7 | -0,534 | 0,255 | 0,104 | LN |
| **DS1 ($kg/dm^3$)** | 1,474 | 1,507 | 1,055 | 1,753 | 0,144 | 9,8 | -0,565 | -0,523 | 5,0.10 | IN |
| **DS2 ($kg/dm^3$)** | 1,669 | 1,673 | 1,551 | 1,773 | 0,051 | 3,1 | -0,711 | -0,203 | 0,091 | NO |
| **DS3 ($kg/dm^3$)** | 1,687 | 1,690 | 1,484 | 1,902 | 0,070 | 4,1 | 0,272 | 0,177 | 0,784 | NO |
| **DSM ($kg/dm^3$)** | 1,610 | 1,614 | 1,463 | 1,729 | 0,056 | 3,5 | -0,301 | -0,317 | 0,257 | NO |
| **RP1 (MPa)** | 1,836 | 1,769 | 0,589 | 3,434 | 0,590 | 32,2 | -0,278 | 0,236 | 0,295 | NO |
| **RP2b (MPa)[c]** | 3,058 | 2,891 | 0,982 | 6,383 | 0,146 | 9,8 | 0,330 | 0,096 | 0,024 | TL |
| **RP3a (MPa)[c]** | 3,019 | 2,884 | 1,778 | 6,871 | 0,155 | 32,4 | 0,070 | 0,188 | 0,140 | LN |
| **RPMa (MPa)[c]** | 2,678 | 2,559 | 1,211 | 5,047 | 0,127 | 30,1 | -0,219 | 0,171 | 0,145 | LN |
| **UG1 (kg/kg)** | 0,111 | 0,112 | 0,041 | 0,179 | 0,024 | 21,7 | 1,194 | -0,288 | 0,003 | IN |
| **UG2 (kg/kg)** | 0,100 | 0,102 | 0,068 | 0,132 | 0,013 | 13,1 | 0,119 | -0,348 | 0,080 | NO |
| **UG3 (kg/kg)** | 0,104 | 0,104 | 0,081 | 0,132 | 0,009 | 8,8 | 0,082 | 0,009 | 0,615 | NO |
| **UGM (kg/kg)** | 0,105 | 0,107 | 0,072 | 0,141 | 0,013 | 12,0 | 0,444 | -0,315 | 0,036 | TN |

[a] MSF = produtividade de massa seca da forragem; AME = altura média de inserção da primeira espiga; ALT = altura da planta; DMC = diâmetro do colmo; MA, MI, PT, DS, RP e UG, são respectivamente a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência mecânica à penetração e umidade gravimétrica do solo, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; MAM, MIM, PTM, DSM, RPM e UGM são respectivamente os valores médios dos referidos atributos; [b] DF = distribuição de freqüência, sendo NO, TN, LN, TL e IN respectivamente do tipo normal, tendendo à normal, lognormal, tendendo à lognormal e indefinida; [c] 1) atributos sucedidos das letras a, b e c tiveram valores representados pelos logaritmos decimais respectivamente divididos por 1, 10 e 100, e 2) valores ATR da média, mediana, mínimo e máximo retrotransformados por ATR = $10^{\log ATR}$.

Filho et al. (2006) e Santos et al. (2006), nos quais ora foram baixas ora médias (Quadro 2).

No Quadro 2, a variabilidade dos dados da RP e da UG apresentou-se muito inconsistente. Para a RP ela foi muito alta (RP1, RP3 e RPM) e baixa (RP2), assim como, para a UG, foi alta (UG1), média (UG2 e UGM) e baixa para a UG3. Tais dados, no geral, ficaram de acordo com o observado na literatura, na qual tais atributos têm sido relatados como de elástica variabilidade (IMHOFF et al., 2000; SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002; ABREU et al., 2003; MERCANTE et al., 2003; JOHANN et al., 2004; GREGO ;VIEIRA, 2005; FREDDI et al., 2006).

### 4.1.2. Distribuição de freqüência e valores médios dos atributos estudados

#### 4.1.2.1. Atributos da planta

Quando uma variável qualquer possui distribuição de freqüência normal, a sua medida representante da tendência central mais adequada deve ser a média. Por outro lado, para variáveis com distribuição lognormal deve-se usar a mediana. Assim, para os atributos da planta estabelecidos no Quadro 2, a distribuição de freqüência foi normal para a MSF, ALTe a DMC,assim como lognormal para a AMEa. O valor médio da MSF foi de 14842 kg/ha, concordando com Borghi (2001), quando utilizado preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto e com três populações diferentes de milho, o qual obteve a produtividade de 14780 kg/ha. No entanto, ficou 7,8% acima da encontradas por Lima (2005), que foi de 13770 kg/ha, quando trabalhado com modos e épocas de adubação da cultura do milho, nas modalidades de plantio direto e cultivo mínimo. Entretanto, tal valor ficou estabelecido na faixa de produtividade de massa seca, apresentada por Cruz et al. (2001), a qual variou entre 4590-22180 kg/ha, para distintos cultivares de milho. Porém, foi superior àquela indicada por Fahl et al. (1998) para o estado de São Paulo (8000-12000 kg/ha), muito provavelmente devido à irrigação utilizada, uma vez que se tratava de milho *safrinha* outonal. Já para a AMEa, ALT e a DMC, apenas a primeira teve distribuição de freqüência tendendo à lognormal, uma vez que nas restantes foi normal.

#### 4.1.2.2. Atributos do solo

A distribuição de freqüência da MA (Quadro 2) foi indefinida (MA1 e MA3), tendendo a normal (MA2) e lognormal para MAMc. A MI apresentou distribuição de freqüência normal, com exceção da MIM, na qual foi indefinida. Já para a PT, ela foi indefinida (PT1), normal (PT2 e PT3) e lognormal (PTMb). Assim, os valores médios da MA foram de 0,123 $m^3/m^3$ (MA1), 0,040 $m^3/m^3$ (MA2), de 0,046 $m^3/m^3$ (MA3) e de 0,063 $m^3/m^3$ (MAMc), mostrando menores valores nas camadas subsuperficiais de forma a concordar com os trabalhos de Souza et al. (2001, 2004), Carvalho et al. (2002) e de Secco et al. (2005). Tais valores também indicaram que a segunda e a terceira camadas encontraram-se razoavelmente compactadas, uma vez que seus valores ficaram muito abaixo do valor crítico ideal de 0,10 $m^3/m^3$ preconizado por Baver et al. (1973), Medina (1975) e Kiehl (1979). Essa compactação, provavelmente pode ter reduzido substancialmente a produtividade vegetal, que foi de 14842 kg/ha, uma vez que havia o potencial para a produtividade de até 22180 kg/ha, conforme Cruz et al. (2001). O fato de a camada superficial apresentar maior valor de macroporosidade se deve à grande quantidade de raízes da brachiária dessecada. A MI em profundidade

apresentou valores de 0,244 $m^3/m^3$ (MI1), 0,250 $m^3/m^3$ (MI2), 0,253 $m^3/m^3$ (MI3), cujo valor médio foi de 0,249 $m^3/m^3$ (MIM). Desta forma, esses dados indicaram uma tendência crescente em profundidade, inversamente ao que foi notado para a macroporosidade, uma vez que são atributos interdependentes, isto é, com a diminuição da MA ocorre normalmente um aumento da MI. O comportamento apresentado pela microporosidade foi semelhante aos valores verificados por Souza et al. (2001, 2004), Carvalho et al. (2002) e Secco et al. (2005), os quais também verificaram valores crescentes da microporosidade com o aprofundamento no perfil do solo. Também, a porosidade total apresentou valores de 0,367 $m^3/m^3$ (PT1), de 0,291 $m^3/m^3$ (PT2) e de 0,299 $m^3/m^3$ (PT3), com o valor médio de 0,318 $m^3/m^3$ (PTMb), mostrando também, a exemplo da macroporosidade, uma tendência decrescente no perfil do solo, corroborando o aumento da compactação nas duas camadas mais profundas do solo. Tal fato ficou de acordo com os dados de Souza et al. (2001, 2004), Carvalho et al. (2002), Secco et al. (2005) e Santos et al. (2006).

A distribuição de freqüência encontrada para a densidade do solo (Quadro 2) foi indefinida para DS1 e normal para DS2, DS3 e DSM. Assim, seus valores médios foram de 1,474 $kg/dm^3$ (DS1), 1,669 $kg/dm^3$ (DS2), 1,687 $kg/dm^3$ (DS3) e de 1,610 $kg/dm^3$ (DSM), apresentando acréscimo direto com o aumento da profundidade no perfil do solo, de forma a corroborar, a exemplo da MA e da PT, a maior compactação do solo na segunda e terceira camadas. Dessa forma, provavelmente a camada superficial do solo apresentou-se menos compactada pela maior concentração de raízes que o sistema radicular (fasciculado e abundante) da forrageira anterior (*Brachiaria brizantha* vc. Marandu) pôde adicionar, aliado ao sistema utilizado para o preparo do solo na semeadura do milho (plantio direto). Assim, esses dados ficaram de acordo com aqueles dos trabalhos de Souza et al. (2001); Carvalho et al. (2002) e Freddi et al. (2006), os quais constataram esse mesmo comportamento. Por outro lado, também ficaram próximos do valor crítico (1,850 $kg/dm^3$), indicado por Bowen (1981), o qual é capaz de afetar o desenvolvimento radicular e conseqüentemente a produtividade vegetal, porém, no caso do presente ensaio por se tratar de solo arenoso em área irrigada, os efeitos da compactação se manifestam com menor intensidade.

No Quadro 2, a resistência à penetração do solo resultou distribuição de freqüência do tipo normal (RP1), tendendo a lognormal (RP2b) e lognormal (RP3a e RPMa). Seus valores foram de 1,836; 2,891 e de 2,884 MPa, da primeira para a terceira camadas, cujo valor médio foi de 2,678 MPa (RPMa). Tais valores, segundo a classificação de Arshad et al. (1996), foram respectivamente tidos como moderado (RP1) e alto (RP2, RP3a e RPMa). Assim, eles também puderam corroborar para com o aumento da compactação das duas

camadas inferiores do solo, a exemplo do que havia sido observado, tanto para a macroporosidade como para a densidade do solo. Apesar de se tratar de área irrigada, tal fato pôde também ter atestado o caso da produtividade da MSF não ter assumido maiores cifras, conforme citação de Cruz et al. (2001), em virtude da menor aeração do solo. A umidade gravimétrica apresentou distribuição de freqüência do tipo indefinida (UG1), normal (UG2, UG3) e tendendo a normal (UGM). Seus valores foram de 0,111 kg/kg (UG1), 0,100 kg/kg (UG2), 0,104 kg/kg (UG3) e 0,105 kg/kg (UGM).

## 4.2. Análise de regressão entre os atributos estudados

### 4.2.1. Regressão linear simples

#### 4.2.1.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos estudados

No Quadro 3 esta apresentada a matriz de correlação linear simples entre os atributos da planta de milho (MSF, AME, ALT e DMC), e do solo (PT, MA, MI, DS, RP e UG).

##### 4.2.1.1.1 Atributos da planta *versus* atributos da planta

As correlações entre os atributos da planta (Quadro 3) apresentaram significância exclusivamente para os pares AMEa x ALT (r = 0,532**), MSF x DMC (r = 0,335**) e o DMC x ALT (r = 0,168**). O par de destaque foi o AMEa x ALT, que apresentou a maior correlação. Tal fato tem importância prática para a colheita do milho, uma vez que, sendo positiva tal correlação, tão maior será a altura de inserção da primeira espiga, quanto maior for sua altura. Assim, isso facilitaria sobremaneira a colheita por aumentar a altura de corte, caso o milho seja destinado à produtividade de grãos, e até mesmo para produção de forragem, quando se optar pelo corte alto para deixar parte dessa massa seca visando o incremento de cobertura para o solo em sistema de plantio direto. Também, outra importante correlação prática foi dada pelo par MSF x DMC, pois, quanto maior for o diâmetro do colmo da planta de milho tão maior será a produtividade de matéria seca da forragem e plantas com maior diâmetro de colmo têm maior resistência ao acamamento.

##### 4.2.1.1.2 Atributos da planta *versus* atributos do solo

A correlação entre a MSF e os atributos do solo (Quadro 3) apresentou significância exclusivamente para os pares: 1) MSF x MA1 (r = 0,137*), 2) MSF x MI2 (r = -0,157**), 3) MSF x PT1 (r = 0,199**), 4) MSF x PT2 (r = -0,183**) e 5) MSF x DS1 (r = -0,143*). No primeiro

Quadro 3: Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

(Continua...)

| Atributos[a] | Coeficiente de correlação[b] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **MSF** | **AMEa[c]** | **ALT** | **DMC** | **MA1** | **MA2** | **MA3** | **MAMc[b]** | **MI1** | **MI2** | **MI3** | **MIM** |
| **AMEa[b]** | -0,053 NS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **ALT** | -0,049 NS | 0,532 ** | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **DMC** | 0,335 ** | 0,074 NS | 0,168 ** | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **MA1** | 0,137 * | -0,016 NS | -0,136 * | -0,072 NS | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **MA2** | 0,011 NS | -0,156 ** | -0,184 ** | -0,047 NS | 0,479 ** | - | - | - | - | - | - | - |
| **MA3** | 0,017 NS | -0,045 NS | -0,121 NS | -0,063 NS | 0,177 ** | 0,500 ** | - | - | - | - | - | - |
| **MAMc[b]** | 0,091 NS | -0,037 NS | -0,149 ** | -0,066 NS | 0,925 ** | 0,654 ** | 0,428 ** | - | - | - | - | - |
| **MI1** | 0,060 NS | 0,090 NS | 0,176 ** | 0,160 ** | -0,626 ** | -0,522 ** | -0,359 ** | -0,661 ** | - | - | - | - |
| **MI2** | -0,157 ** | 0,266 ** | 0,349 ** | 0,035 NS | -0,429 ** | -0,562 ** | -0,387 ** | -0,490 ** | 0,458 ** | - | - | - |
| **MI3** | -0,123 NS | 0,324 ** | 0,330 ** | 0,035 NS | -0,496 ** | -0,477 ** | -0,266 ** | -0,513 ** | 0,402 ** | 0,514 ** | - | - |
| **MIM** | -0,060 NS | 0,247 ** | 0,328 ** | 0,115 NS | -0,666 ** | -0,649 ** | -0,428 ** | -0,714 ** | 0,863 ** | 0,786 ** | 0,719 ** | - |
| **PT1** | 0,199 ** | 0,025 NS | -0,081 NS | -0,009 NS | 0,923 ** | 0,332 ** | 0,040 NS | 0,813 ** | -0,277 ** | -0,302 ** | -0,413 ** | -0,393 ** |
| **PT2** | -0,183 ** | 0,113 NS | 0,141 * | -0,058 NS | 0,071 NS | 0,447 ** | 0,188 ** | 0,203 ** | -0,088 NS | 0,396 ** | -0,006 NS | 0,095 NS |
| **PT3** | -0,068 NS | 0,220 ** | 0,245 ** | 0,011 NS | -0,314 ** | -0,049 ** | 0,536 ** | -0,124 NS | 0,148 ** | 0,142 * | 0,571 ** | 0,308 ** |
| **PTMb[b]** | 0,121 NS | 0,126 * | 0,039 NS | -0,019 NS | 0,832 ** | 0,427 ** | 0,256 ** | 0,822 ** | -0,249 ** | -0,145 ** | -0,228 ** | -0,265 ** |
| **DS1** | -0,143 * | -0,008 NS | 0,094 NS | -0,015 NS | -0,890 ** | -0,228 ** | 0,003 NS | -0,760 ** | 0,372 ** | 0,221 ** | 0,386 ** | 0,410 ** |
| **DS2** | -0,001 NS | -0,074 NS | -0,114 NS | -0,086 NS | -0,064 NS | -0,037 NS | 0,169 ** | -0,013 NS | -0,105 NS | -0,173 ** | 0,078 NS | -0,101 NS |
| **DS3** | 0,104 NS | -0,187 ** | -0,207 ** | 0,029 NS | 0,141 * | 0,021 NS | -0,252 ** | 0,037 NS | -0,159 ** | -0,098 NS | -0,304 ** | -0,218 ** |
| **DSM** | -0,080 NS | -0,107 NS | -0,040 NS | -0,027 NS | -0,724 ** | -0,198 ** | -0,051 NS | -0,640 ** | 0,221 ** | 0,097 NS | 0,228 ** | 0,231 ** |
| **RP1** | 0,122 NS | 0,004 NS | -0,187 ** | 0,053 NS | 0,069 NS | -0,089 NS | -0,151 ** | 0,013 NS | 0,000 NS | 0,029 NS | 0,096 NS | 0,039 NS |
| **RP2b[b]** | -0,027 NS | -0,108 NS | -0,273 ** | -0,082 NS | 0,199 ** | 0,096 NS | -0,081 NS | 0,187 ** | -0,242 ** | -0,036 NS | -0,111 NS | -0,185 ** |
| **RP3a[b]** | -0,112 NS | -0,251 ** | -0,309 ** | -0,125 NS | 0,158 ** | 0,171 ** | -0,049 NS | 0,151 ** | -0,313 ** | -0,112 NS | -0,246 ** | -0,294 ** |
| **RPMa[b]** | -0,021 NS | -0,182 ** | -0,323 ** | -0,078 NS | 0,189 ** | 0,108 NS | -0,092 NS | 0,167 ** | -0,260 ** | -0,077 NS | -0,161 ** | -0,226 ** |
| **UG1** | 0,037 NS | 0,064 NS | 0,096 NS | 0,150 ** | -0,251 ** | -0,034 NS | 0,145 ** | -0,204 ** | 0,242 ** | 0,082 NS | -0,003 NS | 0,168 ** |
| **UG2** | 0,019 NS | -0,005 NS | 0,062 NS | 0,165 ** | -0,301 ** | -0,268 ** | -0,124 NS | -0,303 ** | 0,365 ** | 0,196 ** | 0,177 ** | 0,335 ** |
| **UG3** | 0,050 NS | -0,095 NS | -0,025 NS | 0,216 ** | -0,144 * | -0,147 ** | -0,212 ** | -0,161 ** | 0,257 ** | 0,071 NS | 0,141 * | 0,215 ** |
| **UGM** | 0,043 NS | 0,016 NS | 0,077 NS | 0,206 ** | -0,301 ** | -0,151 ** | -0,002 NS | -0,276 ** | 0,345 ** | 0,138 * | 0,094 NS | 0,277 ** |

[a] MSF = produtividade de massa seca da forragem; AME = altura média de inserção da primeira espiga; ALT = altura da planta; DMC = diâmetro médio do colmo; MA, MI, PT, DS, RP e UG, são respectivamente a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência mecânica à penetração e umidade gravimétrica do solo, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; MAM, MIM, PTM, DSM, RPM e UGM são respectivamente os valores médios dos referidos atributos; [b] atributos sucedidos das letras a, b e c tiveram valores representados pelos logaritmos decimais respectivamente divididos por 1, 10 e 100; [c] * Significativo ao nível de 5% de probabilidade, ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, NS Não Significativo.

Quadro 3: Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| ***Atributos***[a] | ***Coeficiente de correlação***[c] | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **PT1** | **PT2** | **PT3** | **PTMb**[b] | **DS1** | **DS2** | **DS3** | **DSM** | **RP1** | **RP2b**[b] | **RP3a**[b] | ***RPMa***[b] | **UG1** | **UG2** | **UG3** |
| **AMEa**[b] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **ALT** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | - |
| **DMC** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MA1** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MA2** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MA3** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MAMc**[b] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MI1** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MI2** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MI3** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **MIM** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **PT1** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **PT2** | 0,044 NS | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **PT3** | -0,313 ** | 0,136 * | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - |
| **PTMb**[b] | 0,902 ** | 0,350 ** | 0,042 NS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **DS1** | -0,913 ** | -0,032 NS | 0,330 ** | -0,807 ** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **DS2** | -0,131 * | -0,301 ** | 0,212 ** | -0,142 * | 0,152 ** | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **DS3** | 0,096 NS | -0,030 NS | -0,498 ** | -0,074 NS | -0,101 NS | -0,025 NS | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **DSM** | -0,782 ** | -0,130 * | 0,140 * | -0,765 ** | 0,861 ** | 0,423 ** | 0,321 ** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **RP1** | 0,085 NS | -0,148 ** | 0,007 NS | 0,046 NS | -0,119 NS | 0,102 NS | -0,003 NS | -0,073 NS | - | - | - | - | - | - | - |
| **RP2b**[b] | 0,125 NS | 0,009 NS | -0,147 ** | 0,083 NS | -0,130 * | 0,100 NS | 0,178 ** | -0,007 NS | 0,493 ** | - | - | - | - | - | - |
| **RP3a**[b] | 0,040 NS | 0,044 NS | -0,233 ** | -0,019 NS | -0,024 NS | 0,151 ** | 0,322 ** | 0,160 ** | 0,243 ** | 0,808 ** | - | - | - | - | - |
| **RPMa**[b] | 0,104 NS | -0,016 NS | -0,185 ** | 0,043 NS | -0,110 NS | 0,143 * | 0,242 ** | 0,049 NS | 0,578 ** | 0,954 ** | 0,896 ** | - | - | - | - |
| **UG1** | -0,190 ** | 0,065 NS | 0,155 ** | -0,123 NS | 0,187 ** | -0,247 ** | -0,069 NS | 0,057 NS | -0,183 ** | -0,359 ** | -0,327 ** | -0,363 ** | - | - | - |
| **UG2** | -0,190 ** | -0,036 NS | 0,108 NS | -0,161 ** | 0,153 ** | -0,236 ** | -0,239 ** | -0,040 NS | -0,192 ** | -0,331 ** | -0,434 ** | -0,404 ** | 0,587 ** | - | - |
| **UG3** | -0,051 NS | -0,067 NS | 0,013 NS | -0,062 NS | -0,018 NS | -0,208 ** | -0,179 ** | -0,153 ** | 0,053 NS | -0,113 NS | -0,261 ** | -0,164 ** | 0,242 ** | 0,423 ** | - |
| **UGM** | -0,200 ** | 0,013 NS | 0,140 * | -0,150 ** | 0,169 ** | -0,291 ** | -0,171 ** | -0,015 NS | -0,171 ** | -0,373 ** | -0,424 ** | -0,414 ** | 0,903 ** | 0,828 ** | 0,546 ** |

[a] MSF = produtividade de massa seca da forragem; AME = altura média de inserção da primeira espiga; ALT = altura da planta; DMC = diâmetro médio do colmo; MA, MI, PT, DS, RP e UG, são respectivamente a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade global, resistência mecânica à penetração e umidade gravimétrica do solo, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; MAM, MIM, PTM, DSM, RPM e UGM são respectivamente os valores médios dos referidos atributos; [b] atributos sucedidos das letras a, b e c tiveram valores representados pelos logaritmos decimais respectivamente divididos por 1, 10 e 100; [c] * Significativo ao nível de 5% de probabilidade, ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, NS Não Significativo.

par foi verificada uma correlação positiva, indicando que quando há aumento da MA1 há uma tendência ao aumento da MSF. Tal fato apresentou-se de forma teoricamente coerente, uma vez que, no Quadro 2, o valor médio da MA1 foi de 0,123 $m^3/m^3$, sendo próximo do limite crítico de 0,100 $m^3/m^3$, como indicado por Baver et al. (1975) e Kiehl (1979). Assim, o aumento da macroporosidade proporcionará uma melhor aeração do sistema radicular, implicando no conseqüente aumento da MSF. Por outro lado, para o segundo par, sua correlação foi inversa, indicando que com aumento da MI2 ocorrerá a diminuição da produtividade de MSF, provavelmente desencadeado pelo fato de que o aumento da microporosidade represente exclusivamente o mesmo com a compactação do solo.

Para o terceiro e quarto pares (MSF x PT1 e MSF x PT2), ocorreu uma inversão da relação entre causa e efeito, isto é, a MSF variou positivamente com a PT1 e negativamente com a PT2 (Quadro 3). Dessa forma, a correlação direta entre a MSF x PT1 indicou, especificamente para a primeira camada do solo, que quanto maior for sua porosidade total tão maior será a respiração celular e, conseqüentemente a produtividade vegetal, ficando esse fato de acordo com Santos et al. (2006). Por outro lado, a correlação inversa entre a MSF x PT2 indicou, especificamente para a segunda camada do solo, uma provável falta de contato da raiz com o próprio solo, o que pôde ter limitado a produtividade vegetal pela diminuição direta da absorção iônica via interceptação radicular. No último par (MSF x DS1) a correlação foi inversa, indicando que com aumento da DS1 ocorrerá à diminuição da MSF, assim como atestando que com o aumento da compactação do solo há a diminuição da produtividade vegetal.

No Quadro 3, as correlações entre a AMEa e os atributos do solo apresentaram significâncias para os pares AMEa x MA2 (r=-0,156**), AMEa x MI2 (r = 0,266**), AMEa x MI3 (r = 0,324**), AMEa x MIM (r = 0,247**), AMEa x PT3 (r = 0,220**), AMEa x PTMb (r = 0,126*), AMEa x DS3 (r = - 0,184**), AMEa x RP3a (r = - 0,251**) e AMEa x RPMa (r = - 0,182**). Já para as correlações entre a ALT e os atributos do solo, a maior correlação foi observada para o par ALT x MI2 (r = 0,349**). Por último, deve-se observar que as correlações entre o DMC e os atributos do solo apresentaram significâncias exclusivamente para os pares estabelecidos com a UG, cujas correlações variaram de 0,150** (DMC x UG1) e 0,216** (DMC x UG3) e a DMC x MI1 (0,160**), esse comportamento, provavelmente se deve ao fato de que com o aumento da microporosidade ocorreu maior retenção de água.

#### 4.2.1.1.3. Atributos do solo versus atributos do solo

No geral, as correlações entre os pares de atributos do solo (Quadro 3) apresentaram-se, quando analisados dois atributos quaisquer dentro da mesma profundidade, com o sinal positivo (correlação direta) ou negativo (correlação indireta) para todas aquelas estabelecidas nas três profundidades e na média das profundidades. Os de correlação direta, com os respectivos valores extremos do coeficiente de correlação, foram o MA x PT (0,923 a 0,447) e o MI x UG (0,277 a 0,141). Já os de correlação indireta foram o MA x MI (-0,714 a -0,266), MA x DS (-0,890 a -0,252), MA x UG (-0,276 a -0,212), MI x RP (-0,246 a -0,226), PT x DS (-0,913 a -0,301) e o RP x UG (-0,412 a -0,183). Ainda que a literatura sobre esse assunto seja escassa, para o caso da PT x DS, os dados do presente trabalho ficaram de acordo com Argenton et al. (2005) e Santos et al. (2006), nos quais tal correlação variou de -0,884 a -0,990. Já para o caso da RP x UG, houve concordância com os dados de Santos et al. (2005), nos quais a correlação variou entre -0,351 a -0,281, assim como, discordou de Argenton et al. (2005) e Carvalho et al. (2006), nos quais elas foram positivas, 0,470 e 0,171 respectivamente.

Entretanto, as correlações entre os pares de atributos do solo (Quadro 3) também se apresentaram, quando analisados dois atributos quaisquer nas quatro profundidades, ora com sinal positivo (correlação direta) ora com negativo (correlação indireta), de forma aleatória nas quatro profundidades. Tais pares foram MI x PT (-0,265 a 0,571), MI x DS (-0,173 a 0,372) e DS x UG (-0,236 a 0,187), de forma a concordar com Argenton et al. (2005), que obtiveram para esse mesmos pares as respectivas correlações de 0,180, -0,140 e 0,470.

### 4.2.1.2. Regressão linear simples entre os atributos estudados

As equações de regressão linear simples entre os atributos da produtividade do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Pereira Barreto (SP) estão apresentadas no (Quadro 4). Foram relatadas as equações de regressão com maior expressividade, apresentadas no Quadro 3, especificamente estabelecidas entre os atributos da planta em função dos do solo. Portanto, os modelos apresentados foram para os pares de atributos que proporcionaram correlações significativas, assim como apresentaram coeficientes adjuntos das variáveis independentes de forma estatisticamente significativos.

As equações de regressão entre os atributos da planta e os do solo revelaram que a MI2, a PT1 e a PT2 foram os únicos atributos significativos com MSF. Assim, a MSF apresentou baixas correlações, embora altamente significativas, com a MI2, PT1 e a PT2, respectivamente representadas pelas Eqs. (4), (5) e (6) contidas no Quadro 4. Desta forma, com o aumento da

MI2 haverá uma diminuição da MSF (Eq. 4), ficando tal fato de acordo com Freddi (2007), que observou resultados semelhantes para a microporosidade do solo, quando correlacionada (r=-0,570) com a produtividade de grãos de milho.

As correlações da MSF com a PT1 e a PT2 (Eq. 5 e 6) variaram de forma contrária,

Quadro 4: Equação de regressão linear simples e coeficientes do ajuste entre atributos da produtividade de forragem do milho sob um Latossolo Vermelho Distrófico.

| MODELO MATEMÁTICO [(a)] | Coeficiente de ajuste [(b)] | | | | | Número da equação |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | c | r | $r^2$ | |
| **MSF = a . EXP $^{MI2.b}$** | $2,213.10^4$ | -1,655 * | - | -0,196** | - | **(4)** |
| **MSF = a + b . PT1** | $1,203.10^4$ | $7,654.10^3$* | - | 0,199** | - | **(5)** |
| **MSF = a . PT2$^b$** | $7,121.10^3$ | $-5,824.10^{-1}$* | - | -0,192** | - | **(6)** |

[(a)] MSF = produtividade de massa seca da forragem (kg/ha), MI2 = microporosidade ($m^3/m^3$) na profundidade de Zero-0,10 m, PT1 e PT2 = respectivamente a porosidade total ($m^3/m^3$) nas profundidades de Zero-0,10 e 0,10–0,20 m; [(b)] * = significativo a 5%, e ** = significativo a 1%.

isto é, com o aumento da PT1, ou com a diminuição da PT2, ocorrerá um aumento da MSF, sendo verdadeiro o inverso (Quadro 4). Essas correlações foram de difícil explicação, uma vez que a primeira camada apresentou uma menor compactação do que a segunda, respectivamente relatadas pelos valores da densidade do solo de 1,474 e 1,669 kg/dm$^3$ (Quadro 2). Entretanto, pode ser sugerido que, em função do elevado enraizamento presente na primeira camada, com o aumento da sua porosidade total haveria condições mais próximas das ideais para que a absorção iônica fosse maximizada, uma vez que a planta não sofreu, em nenhum momento, a falta de água, pelo fato de ter sido utilizada irrigação e fertirrigação na cultura do milho. Já com relação à segunda camada, com a diminuição da PT2, o que poderia ser perfeitamente atendido pelo aumento da densidade do solo (aumento da compactação), ocorreria o aumento da MSF, devido, provavelmente, ao aumento do contato do solo com a raiz.

### 4.2.2. Regressão linear múltipla

Em relação aos atributos da planta (MSF, AMEa, ALT e DMC), quando estabelecidos como variáveis dependentes, e aqueles do solo (MA, MI, PT, DS, RP e UG), como variáveis independentes, houve uma correlação linear múltipla com elevada significância entre eles. Desta forma, a equação ajustada foi a seguinte:

**ALT=2,819-2,762**.MA3+2,418*.PT3-1,691.10$^{-1}$**.RP3a-2,076*.UG3** ($r^2$ = 0,243** ; p<0,01) **(7)**

onde: **ALT** é a altura média da planta (m); **MA3** é a macroporosidade do terceiro nível ($m^3/m^3$); **PT3** é a porosidade total do terceiro nível ($m^3/m^3$); **RP3a** é o logaritmo da resistência à penetração do terceiro nível **(MPa)** e **UG3** é a umidade gravimétrica do terceiro nível (kg/kg).

## 4.3. Análise geoestatística dos atributos estudados

### 4.3.1. Análise semivariográfica simples

#### 4.3.1.1. Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos estudados

No Quadro 5 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para a produtividade de massa seca de forragem de milho e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico de Pereira Barreto (SP). Já nas Figuras de 4 a 7 foram apresentados os respectivos semivariogramas. Assim, ficou atestado que, com exceção do DMC, que apresentou efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial. No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ($r^2$), foi a seguinte: 1) MAMc (0,957), 2) MIM (0,947), 3) MI2 (0,912), 4) MA1 (0,911), 5) MI3 (0,876), 6) UGM (0,866), 7) MI1 (0,863), 8) DSM (0,835), 9) ALT (0,824), 10) UG1 (0,819), 11) MA3 (0,805), 12) AMEa (0,789), 13) UG2 (0,789), 14) UG3 (0,784), 15) MSF (0,770), 16) MA2 (0,770), 17) DS1 (0,757), 18) PT2 (0,756), 19) PT1 (0,709), 20) RP3a (0,680), 21) PTMb (0,664), 22) RP1 (0,642), 23) DS2 (0,611), 24) RP2b (0,469), 25) PT3 (0,445), 26) DS3 (0,420) e 27) RPMa (0,395). Assim, pôde-se constatar, para o melhor atributo (MAMc, 0,957), que a dispersão dos *lags* em torno do semivariograma ajustado (esférico), foi mínima (Figura 5g). Em contrapartida, para o pior (RPMa, 0,395), a referida dispersão foi a maior entre todos eles (Figura 7g). Por outro lado, os valores extremos do alcance da dependência espacial deles foram de 6,6 m (PT2) (figura 6c) e 31,1 m (MA3). (Figura 5e).

Os atributos da planta, quando comparados entre todos (Quadro 5), ocuparam a nona, décima segunda e décima quinta posições, respectivamente para a ALT, AMEa e a MSF. Os respectivos modelos ajustados foram do tipo gaussiano para os dois primeiros, assim como o exponencial para o terceiro. Também, seus alcances foram de 12,0 m (MSF), 28,0 m (AMEa) e de 24,0 m (ALT). Especificamente ao alcance da MSF, o valor obtido pelo presente ficou acima daqueles de Abreu et al. (2003) e de Santos et al. (2005), que foram respectivamente de 8,5 m, pesquisando a produtividade de trigo num Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico, e de 6,1 m, a de feijão num Latossolo Vermelho Distrófico. Por outro lado, ficou abaixo dos de Vieira; Gonzalez (2003), Carvalho et al. (2006), Freddi et al. (2006) e de Santos et al. (2006), os

Quadro 5: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| | Parâmetros | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Atributo** [(a)] | Modelo [(b)] | Efeito Pepita ($C_0$) | Patamar ($C_0$+C) | Alcance (m) ($A_0$) | $r^2$ | SQR [(c)] | ADE [(d)] | Classe de dependência espacial |
| | | | ***γ(h) simples dos atributos*** | | | | | |
| **MSF (kg/ha)** | exp | $1,250.10^{6}$ | $4,715.10^{6}$ | 12,0 | 0,770 | $1,667.10^{12}$ | 73,5 | moderada |
| **AMEa (m)**[(e)] | gau | $1,580.10^{-4}$ | $4,620.10^{-4}$ | 28,0 | 0,789 | $3,541.10^{-8}$ | 65,8 | moderada |
| **ALT (m)** | gau | $1,550.10^{-3}$ | $9,000.10^{-3}$ | 24,0 | 0,824 | $1,477.10^{-5}$ | 82,8 | alta |
| **DMC (cm)** | epp | $1,567.10^{-2}$ | $1,567.10^{-2}$ | - | - | - | - | - |
| **MA1 ($m^3/m^3$)** | exp | $1,000.10^{-5}$ | $5,940.10^{-3}$ | 18,0 | 0,911 | $2,040.10^{-6}$ | 99.8 | alta |
| **MA2 ($m^3/m^3$)** | esf | $8,900.10^{-5}$ | $2,930.10^{-4}$ | 18,0 | 0,770 | $1,157.10^{-8}$ | 69,6 | moderada |
| **MA3 ($m^3/m^3$)** | exp | $5,400.10^{-5}$ | $2,410.10^{-4}$ | 31,1 | 0,805 | $7,589.10^{-9}$ | 77,6 | alta |
| **MAMc ($m^3/m^3$)**[(e)] | esf | $7,690.10^{-3}$ | $3,858.10^{-2}$ | 18,1 | 0,957 | $3,390.10^{-5}$ | 80,1 | alta |
| **MI1 ($m^3/m^3$)** | gau | $1,840.10^{-4}$ | $9,880.10^{-4}$ | 27,5 | 0,863 | $1,398.10^{-7}$ | 81,4 | alta |
| **MI2 ($m^3/m^3$)** | esf | $7,000.10^{-5}$ | $3,020.10^{-4}$ | 19,1 | 0,912 | $4,608.10^{-9}$ | 76,8 | alta |
| **MI3 ($m^3/m^3$)** | esf | $7,100.10^{-5}$ | $2,680.10^{-4}$ | 20,0 | 0,876 | $4,005.10^{-9}$ | 73,5 | moderada |
| **MIM ($m^3/m^3$)** | gau | $6,800.10^{-5}$ | $3,630.10^{-4}$ | 25,7 | 0,947 | $4,869.10^{-9}$ | 81,3 | alta |
| **PT1 ($m^3/m^3$)** | exp | $1,200.10^{-4}$ | $3,630.10^{-3}$ | 13,8 | 0,709 | $2,749.10^{-6}$ | 96,7 | alta |
| **PT2 ($m^3/m^3$)** | esf | $3,300.10^{-5}$ | $1,870.10^{-4}$ | 6,6 | 0,756 | $3,181.10^{-9}$ | 82,4 | alta |
| **PT3 ($m^3/m^3$)** | gau | $1,700.10^{-4}$ | $3,700.10^{-4}$ | 8,7 | 0,445 | $2,916.10^{-8}$ | 54,1 | moderada |
| **PTMb ($m^3/m^3$)**[(e)] | esf | $5,900.10^{-5}$ | $7,650.10^{-4}$ | 9,5 | 0,664 | $1,893.10^{-7}$ | 92,3 | alta |
| **DS1 (kg/dm3)** | esf | $1,320.10^{-3}$ | $1,784.10^{-2}$ | 14,3 | 0,757 | $6,968.10^{-5}$ | 92,6 | alta |
| **DS2 (kg/dm3)** | esf | $8,500.10^{-4}$ | $2,200.10^{-3}$ | 10,2 | 0,611 | $6,525.10^{-7}$ | 61,4 | moderada |
| **DS3 (kg/dm3)** | gau | $2,900.10^{-4}$ | $5,000.10^{-3}$ | 8,7 | 0,420 | $3,505.10^{-6}$ | 42,0 | moderada |
| **DSM (kg/dm3)** | esf | $3,290.10^{-4}$ | $2,638.10^{-3}$ | 7,8 | 0,835 | $5,339.10^{-7}$ | 87,5 | alta |
| **RP1 (MPa)** | esf | $1,374.10^{-1}$ | $3,298.10^{-1}$ | 25,0 | 0,642 | $1,090.10^{-2}$ | 58,3 | moderada |
| **RP2b (MPa)**[(e)] | exp | $9,230.10^{-3}$ | $2,116.10^{-2}$ | 21,6 | 0,469 | $1,240.10^{-4}$ | 56,4 | moderada |
| **RP3a (MPa)**[(e)] | exp | $4,970.10^{-3}$ | $2,324.10^{-2}$ | 9,0 | 0,680 | $5,330.10^{-5}$ | 78,6 | alta |
| **RPMa (MPa)**[(e)] | exp | $6,460.10^{-3}$ | $1,592.10^{-2}$ | 17,4 | 0,395 | $7,479.10^{-5}$ | 59,4 | moderada |
| **UG1 (kg/kg)** | esf | $6,600.10^{-5}$ | $4,420.10^{-4}$ | 8,8 | 0,819 | $1,788.10^{-8}$ | 85,1 | alta |
| **UG2 (kg/kg)** | esf | $4,000.10^{-5}$ | $1,400.10^{-4}$ | 11,5 | 0,789 | $1,781.10^{-9}$ | 71,4 | moderada |
| **UG3 (kg/kg)** | exp | $1,800.10^{-5}$ | $7,500.10^{-5}$ | 10,5 | 0,784 | $3,903.10^{-10}$ | 76,0 | alta |
| **UGM (kg/kg)** | esf | $5,800.10^{-5}$ | $1,370.10^{-4}$ | 10,9 | 0,866 | $6,049.10^{-10}$ | 57,7 | moderada |

[(a)] MSF = produtividade de massa seca da forragem, AME = altura média da primeira espiga, ALT = altura da planta, DMC = diâmetro médio do colmo, MA = macroporosidade, MAM = macroporosidade média, MI = microporosidade, MIM = microporosidade média, PT = porosidade total, PTM = porosidade total média, DS = densidade do solo, DSM = densidade do solo média, RP = resistência mecânica à penetração, RPM = resistência mecânica à penetração média, UG = umidade gravimétrica e UGM = umidade gravimétrica média, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; [(b)] exp = exponencial, gau = gaussiano, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; [(c)] SQR = soma dos quadrados dos resíduos; [(d)] ADE = avaliador da dependência espacial; [(e)] atributos sucedidos pelas letras a, b e c tiveram valores representados pelos logaritmos decimais respectivamente divididos por 1, 10 e 100.

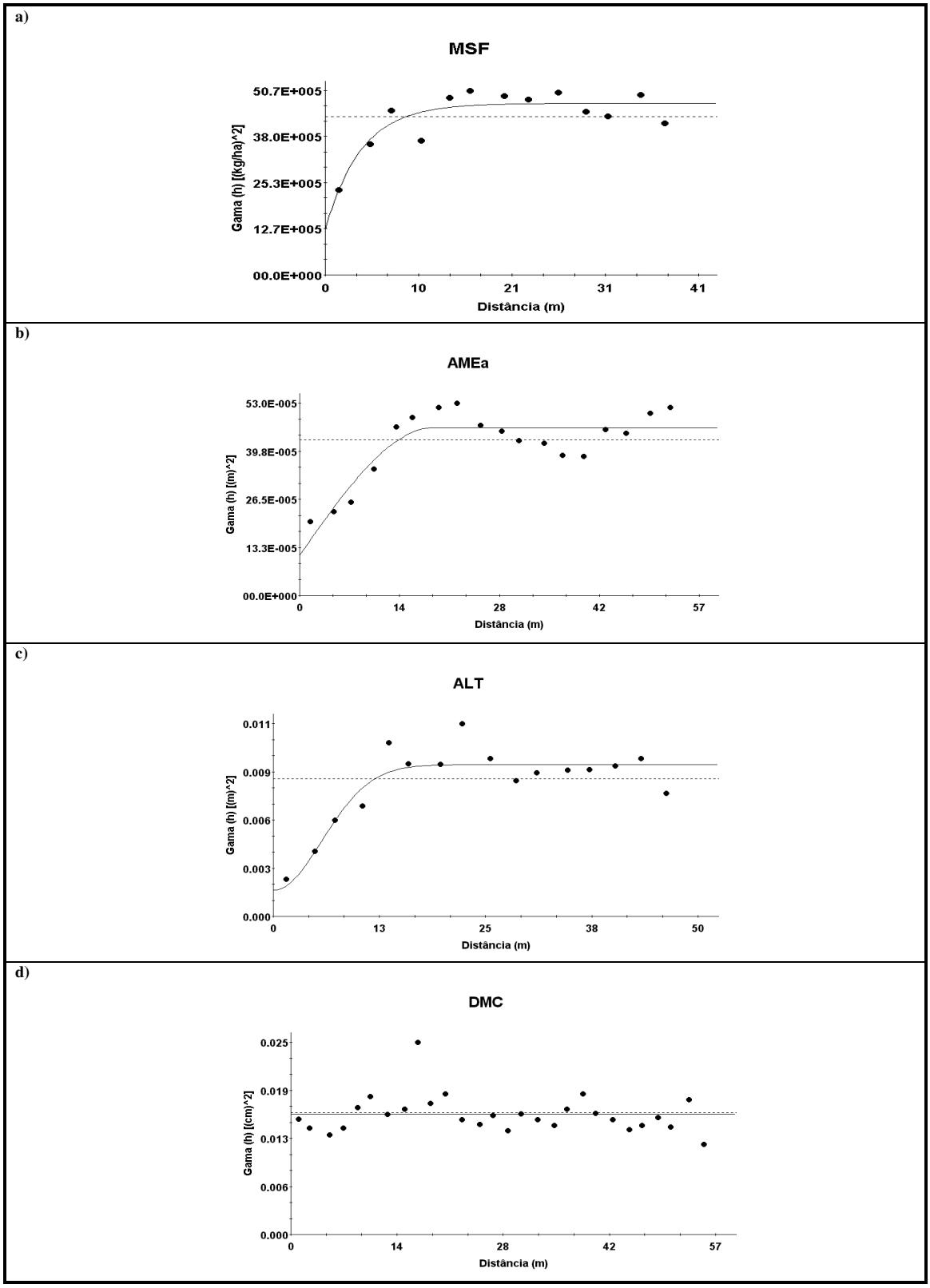


Figura 4: Semivariogramas simples dos atributos (MSF, AMEA, ALT E DMC) do milho sob um Latossolo Vermelho Distrófico.

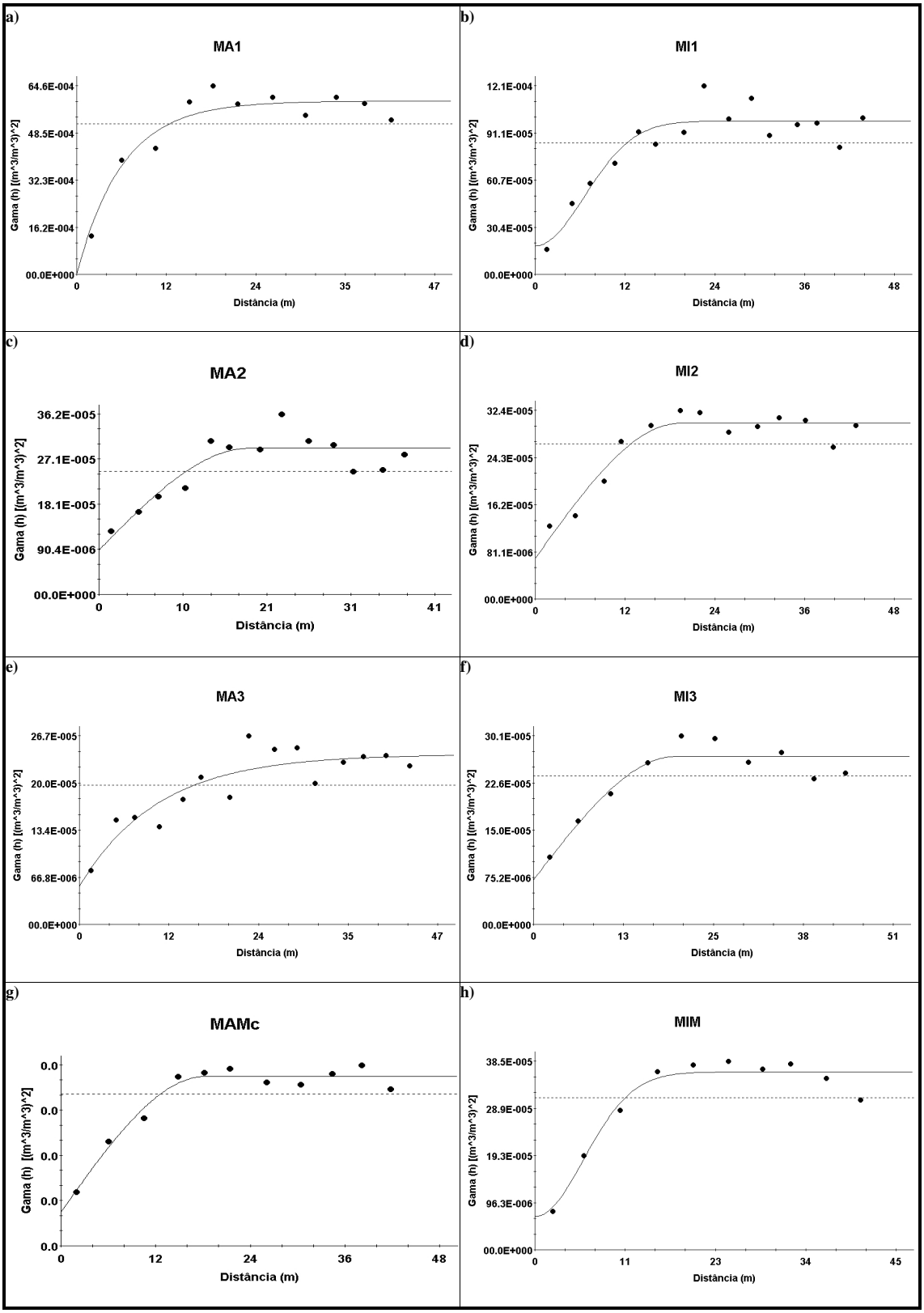


Figura 5: Semivariogramas simples dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

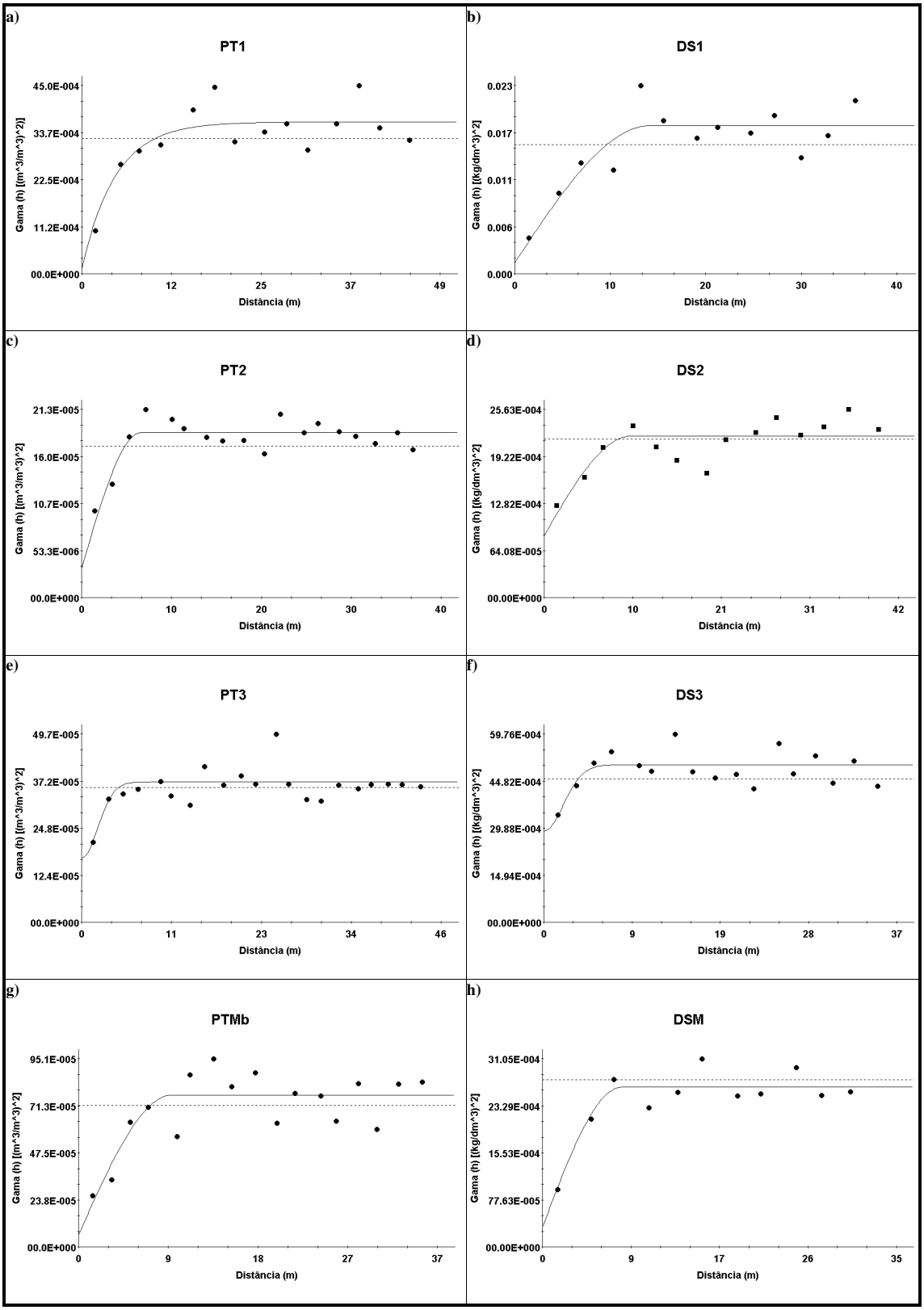


Figura 6: Semivariogramas simples dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 e DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

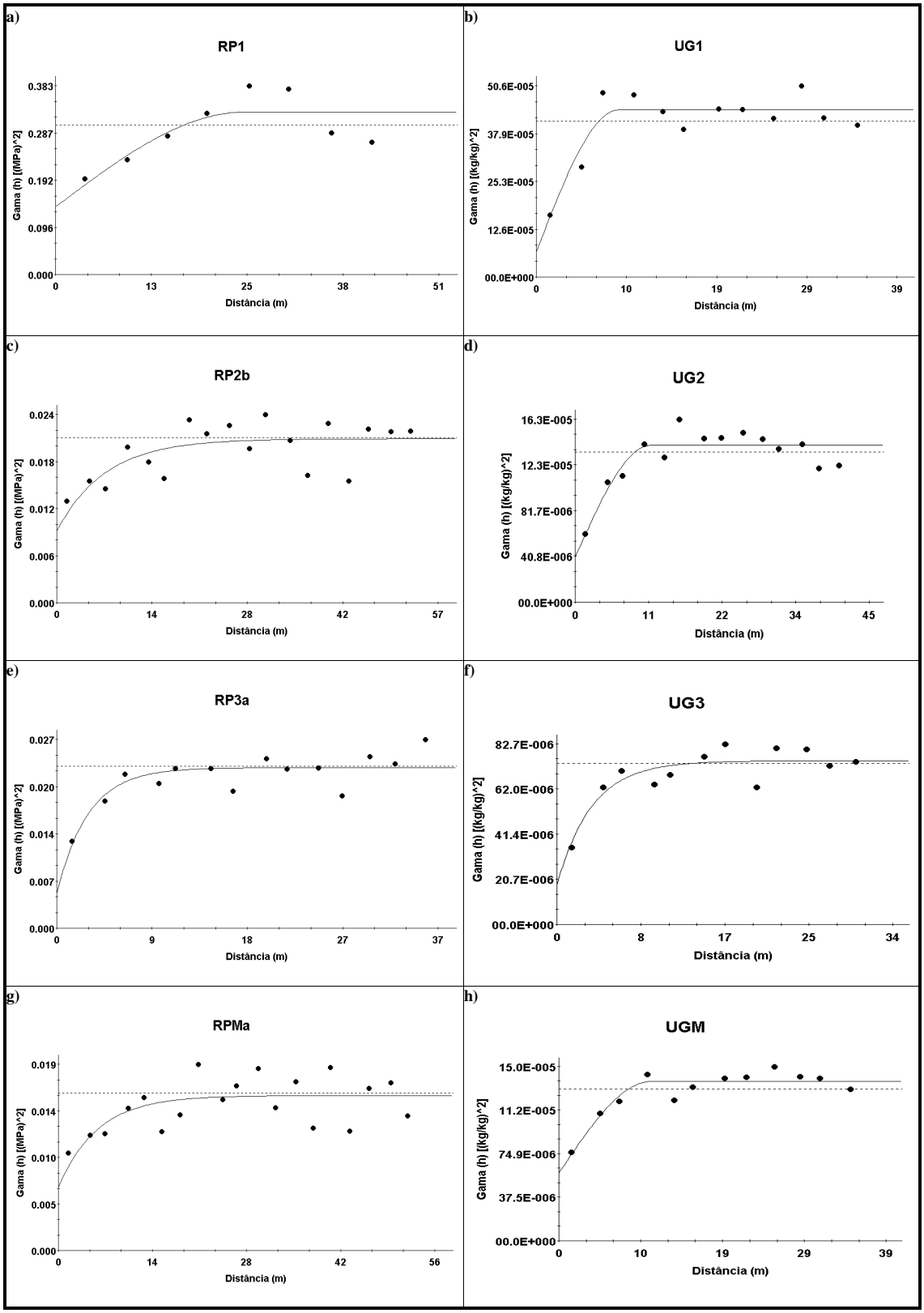


Figura 7: Semivariogramas simples dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

quais, trabalhando com a produtividade de feijão e de milho num Latossolo Vermelho Distroférrico, tiveram alcances variando entre 15,3 e 41,3 m.

No Quadro 5, os cinco melhores atributos do solo apresentaram excelentes ajustes semivariográficos, uma vez que seus coeficientes de determinação espacial variaram entre 0,957 (MAMc) e 0,876 (MI3). Tais valores ficaram muito próximos dos de Souza et al. (2004), quando trabalhando num Latossolo Vermelho Eutroférrico encontraram a faixa entre 0,870 - 0,920. A amplitude de variação do alcance da dependência espacial destes melhores atributos do solo foi de 18,0 - 25,7 m, para MA1 e MIM respectivamente, ficando dentro da faixa de 8,4 e 80,0 m, pesquisada para os referidos atributos, nas condições de alguns Latossolos Vermelho Distróficos brasileiros (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; GREGO; VIEIRA, 2005).

#### 4.3.1.2. Validação cruzada dos semivariogramas simples dos atributos estudados

No Quadro 6 estão apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes as krigagens de alguns atributos do milho e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico. Nas Figuras 8 a 11 são apresentadas as validações cruzadas dos semivariogramas presentes no Quadro 5, a relação decrescente delas, analisada pela grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) MIM (0,773), 2) ALT (0,761), 3) MI2 (0,725), 4) MA1 (0,720), 5) UG1 (0,718), 6) DS1 (0,715), 7) MI1 (0,711), 8) MAMc (0,694), 9) AMEa (0,679), 10) MI3 (0,671), 11) PT1 (0,658), 12) UG2 (0,633), 13) MA2 (0,603), 14) RPMa (0,603), 15) PTMb (0,589), 16) RP3a (0,579), 17) RP1 (0,575), 18) UGM (0,574), 19) RP2b (0,573), 20) MA3 (0,567), 21) DSM (0,561), 22) DS2 (0,560), 23) MSF (0,505), 24) UG3 (0,451), 25) PT3 (0,425), 26) PT2 (0,372) e o 27) DS3 (0,256). Assim, as cinco melhores validações cruzadas foram estabelecidas para os atributos MIM, ALT, MI2, MA1 e UG1, cujos coeficientes de correlação variaram de 0,773 a 0,718, ficando, especificamente entre os atributos da planta, em segundo (ALT), nono (AMEa) e vigésimo terceiro lugares (MSF). Por outro lado, os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,763 (DS3) e 1,012 (RP2b). Portanto houve, no primeiro caso, uma subestimativa do valor estimado para o atributo, ao passo que, no segundo, uma superestimativa. Contudo, para a grande maioria deles, a magnitude do coeficiente b ficou ao redor de um, que foi preconizada como ideal conforme GS+ (2004).

Quadro 6: Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens de alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho.

| **Atributo** [(a)] | **Coeficiente de correlação (r)** | **VO = a + b . VE** [(b)] | |
|---|---|---|---|
| | | a | b |
| **MSF (kg/ha)** | 0,505 | $1,647.10^{3}$ | $8,940.10^{-1}$ |
| **AMEa (m)**[(c)] | 0,679 | $5,000.10^{-4}$ | $9,970.10^{-1}$ |
| **ALT (m)** | 0,761 | $7,460.10^{-3}$ | $9,720.10^{-1}$ |
| **DMC (cm)**[(d)] | - | - | - |
| **MA1 ($m^3/m^3$)** | 0,720 | $5,900.10^{-3}$ | $9,750.10^{-1}$ |
| **MA2 ($m^3/m^3$)** | 0,603 | $-1,000.10^{-4}$ | 1,001 |
| **MA3 ($m^3/m^3$)** | 0,567 | $3,300.10^{-3}$ | $9,270.10^{-1}$ |
| **MAMc ($m^3/m^3$)**[(c)] | 0,694 | $7,050.10^{-2}$ | $9,170.10^{-1}$ |
| **MI1 ($m^3/m^3$)** | 0,711 | $1,610.10^{-2}$ | $9,340.10^{-1}$ |
| **MI2 ($m^3/m^3$)** | 0,725 | $1,300.10^{-3}$ | $9,930.10^{-1}$ |
| **MI3 ($m^3/m^3$)** | 0,671 | $7,500.10^{-3}$ | $9,700.10^{-1}$ |
| **MIM ($m^3/m^3$)** | 0,773 | $7,500.10^{-3}$ | $9,700.10^{-1}$ |
| **PT1 ($m^3/m^3$)** | 0,658 | $1,450.10^{-2}$ | $9,700.10^{-1}$ |
| **PT2 ($m^3/m^3$)** | 0,372 | $5,560.10^{-2}$ | $8,070.10^{-1}$ |
| **PT3 ($m^3/m^3$)** | 0,425 | $5,600.10^{-2}$ | $8,140.10^{-1}$ |
| **PTMb ($m^3/m^3$)**[(c)] | 0,589 | $3,410.10^{-2}$ | $9,330.10^{-1}$ |
| **DS1 (kg/dm3)** | 0,715 | $8,260.10^{-2}$ | $9,430.10^{-1}$ |
| **DS2 (kg/dm3)** | 0,560 | $-9,200.10^{-3}$ | 1,006 |
| **DS3 (kg/dm3)** | 0,276 | $3,999.10^{-1}$ | $7,630.10^{-1}$ |
| **DSM (kg/dm3)** | 0,561 | $8,400.10^{-2}$ | $9,470.10^{-1}$ |
| **RP1 (MPa)** | 0,575 | $3,520.10^{-2}$ | $9,810.10^{-1}$ |
| **RP2b (MPa)**[(c)] | 0,573 | $-1,830.10^{-2}$ | 1,012 |
| **RP3a (MPa)**[(c)] | 0,579 | $-1,000.10^{-3}$ | 1,002 |
| **RPMa (MPa)**[(c)] | 0,603 | $-4,000.10^{-4}$ | 1,001 |
| **UG1 (kg/kg)** | 0,718 | $1,000.10^{-4}$ | $9,990.10^{-1}$ |
| **UG2 (kg/kg)** | 0,633 | $2,000.10^{-4}$ | $9,990.10^{-1}$ |
| **UG3 (kg/kg)** | 0,451 | $1,440.10^{-1}$ | $8,590.10^{-1}$ |
| **UGM (kg/kg)** | 0,574 | $-6,000.10^{-4}$ | 1,005 |

[(a)]MSF = produtividade de massa seca da forragem, AME = altura média da primeira espiga, ALT = altura da planta, DMC = diâmetro médio do colmo, MA = macroporosidade, MAM = macroporosidade média, MI = microporosidade, MIM = microporosidade média, PT = porosidade total, PTM = porosidade total média, DS = densidade do solo, DSM = densidade do solo média, RP = resistência mecânica à penetração, RPM = resistência mecânica à penetração média, UG = umidade gravimétrica e, UGM = umidade gravimétrica média, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; [(b)] VO = valor observado e VE = valor estimado; [(c)] atributos sucedidos pelas letras a, b e c tiveram valores representados pelos logaritmos decimais respectivamente divididos por 1, 10 e 100; [(d)] epp = efeito pepita puro.

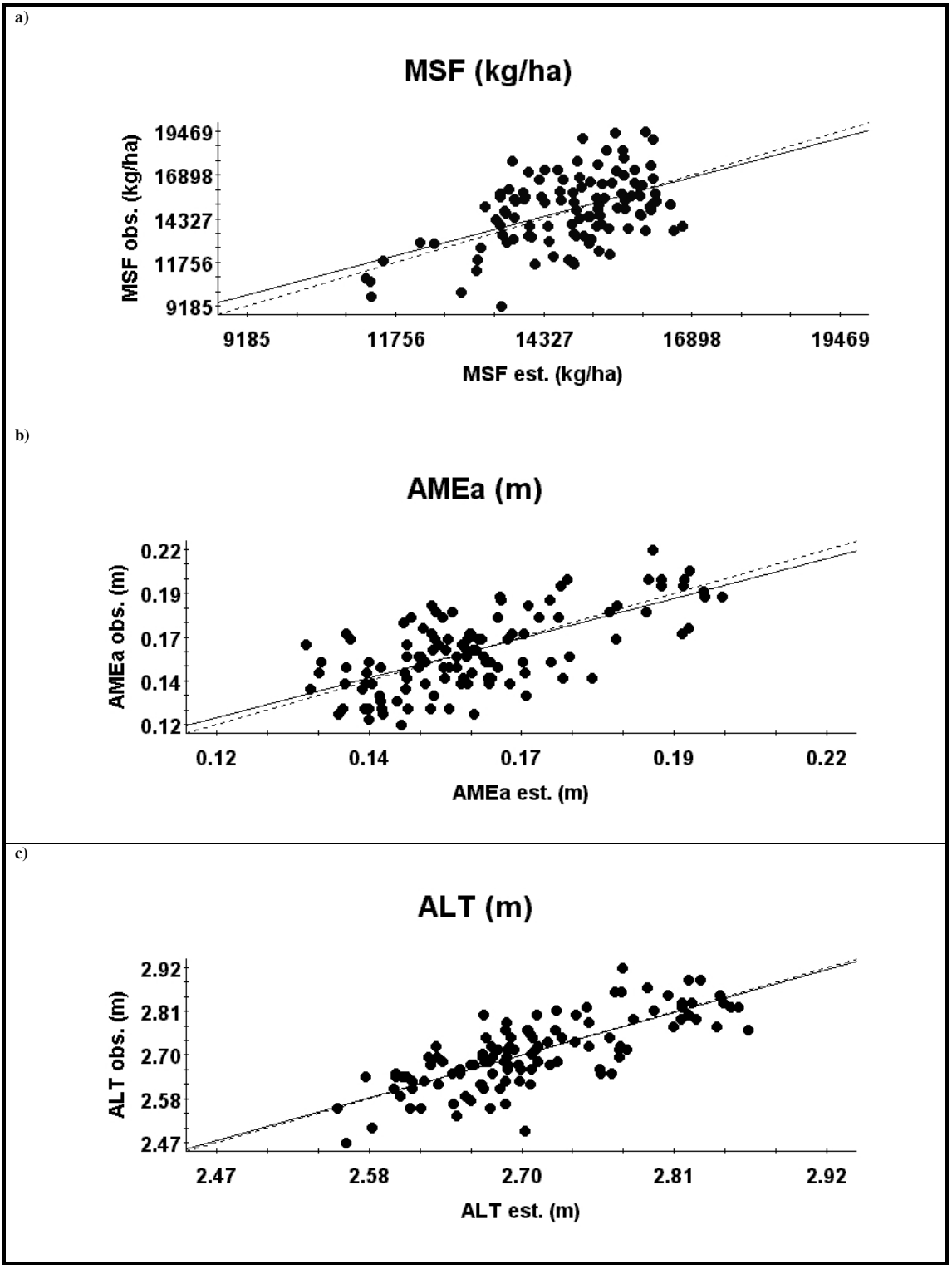


Figura 8: Validação cruzada dos atributos (MSF, AMEA e ALT) do milho em um Latossolo Vermelho Distrófico.

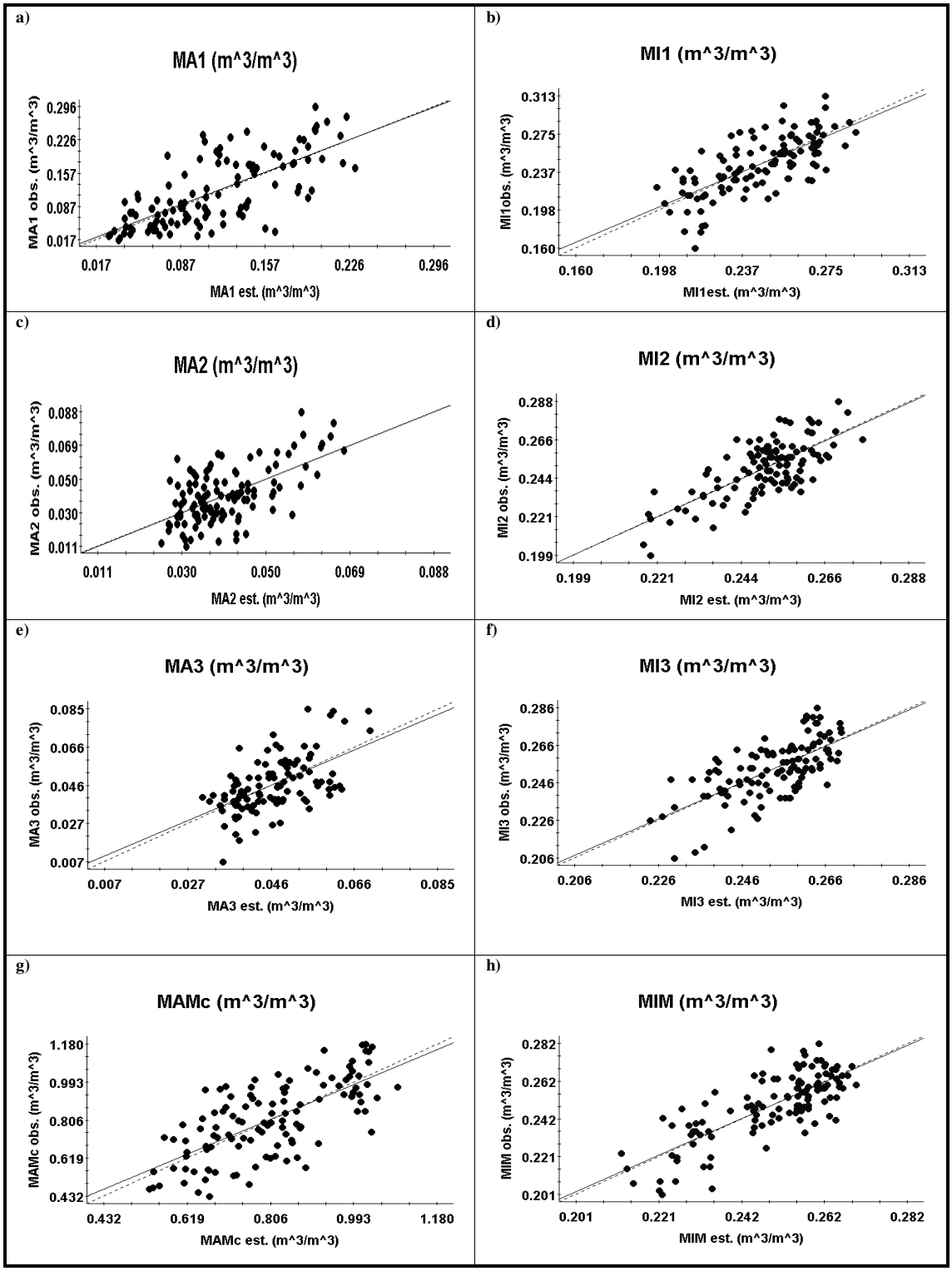


Figura 9: Validação cruzada dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

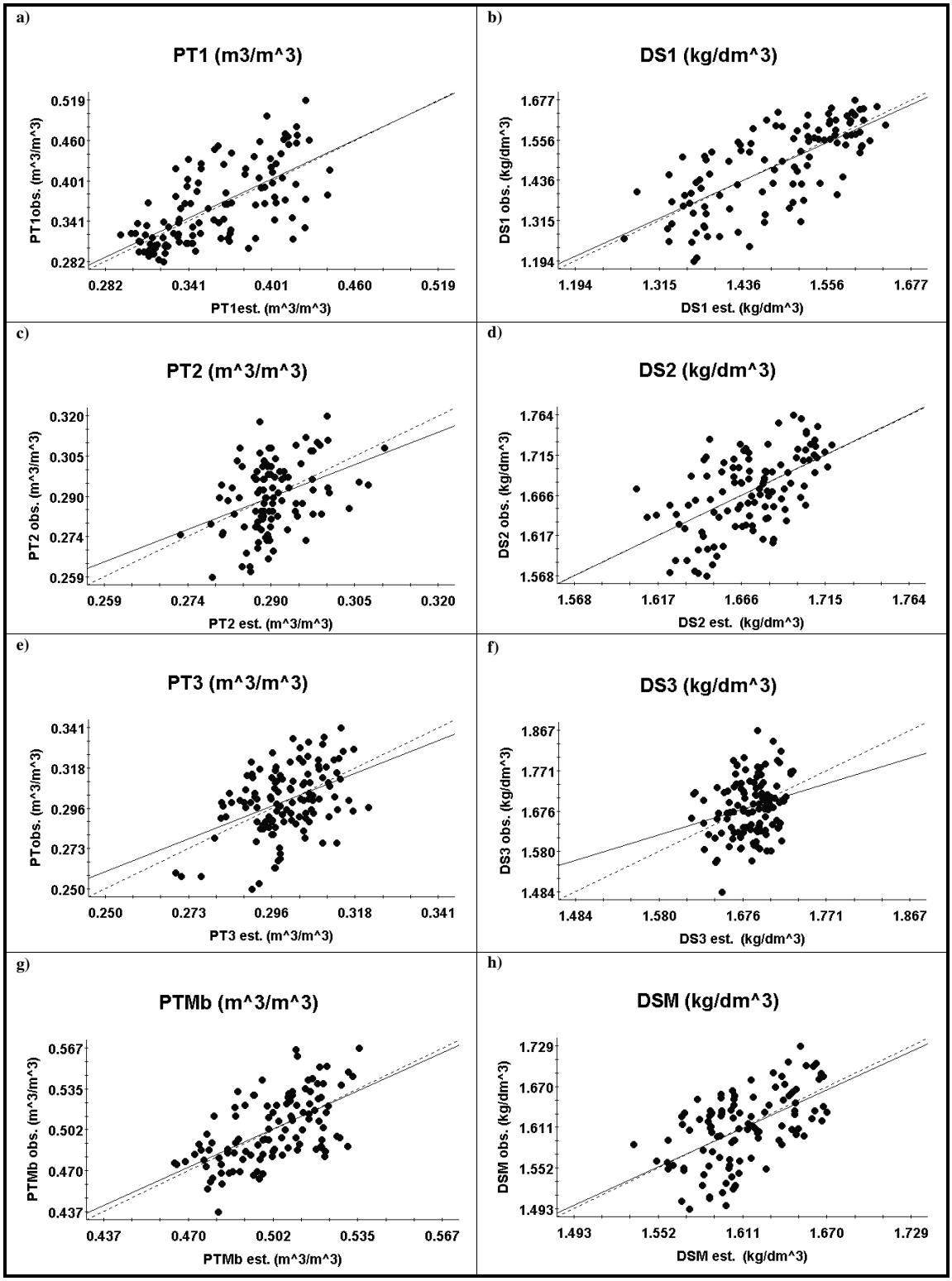


Figura 10: Validação cruzada dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 e DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

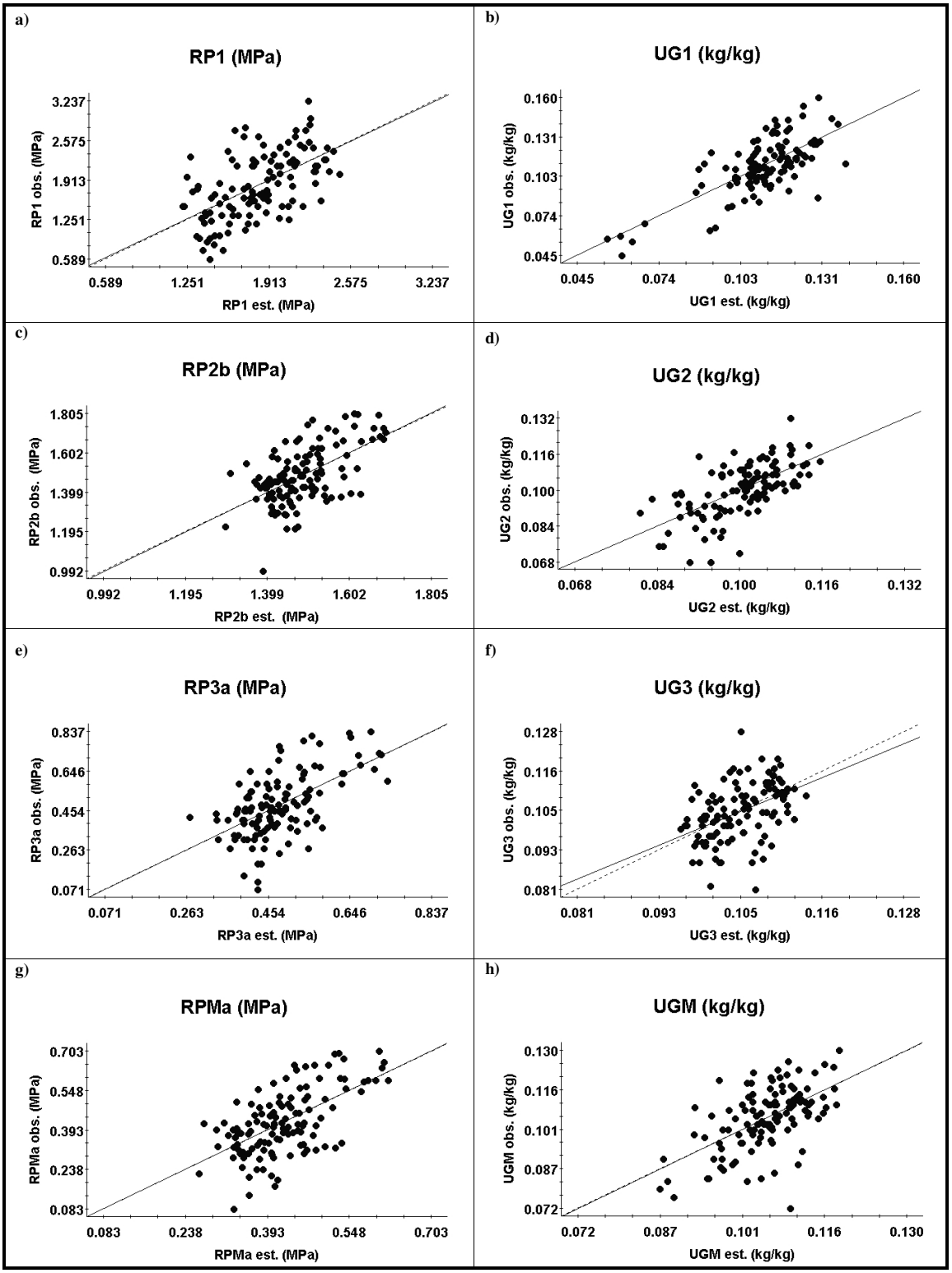


Figura 11: Validação cruzada dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

#### 4.3.1.3. Mapas de krigagem dos atributos estudados

Nas Figuras de 12 a 15 estão apresentados os mapas de krigagem de alguns atributos do milho e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico. Desta forma, na Figura 12a, o mapa de krigagem da produtividade de massa seca da forragem do milho apresentou os menores valores (11663-14468 kg/ha) nas regiões noroeste, sudoeste, sul e sudeste, ao passo que os maiores valores (15403-17272 kg/ha) nas regiões norte, nordeste, leste, assim como no centro do mapa.

Para os atributos do solo merecem destaques a MI2 (Figura 13d) e a MA1 (Figura 13a), uma vez que representaram respectivamente o terceiro e quarto melhores ajustes, tanto para os semivariogramas (Quadro 5) quanto para as validações cruzadas (Quadro 6). Assim, no mapa de krigagem da MA1, observou-se que os menores valores (0,055-0,122 $m^3/m^3$) encontram-se nas regiões norte, noroeste, sudoeste, sul e sudeste, ao passo que os maiores valores (0,122-0,254 $m^3/m^3$) encontram-se na região central e nordeste do mapa. Porém, para esse atributo, não foi notada uma apreciável semelhança espacial com a MSF. Já a MI2 apresentou seus menores valores (0,216-0,241 $m^3/m^3$) nas regiões nordeste, central, leste, ao passo que os maiores valores (0,241-0,267 $m^3/m^3$) nas regiões, noroeste, oeste, sudoeste, sul e sudeste. Desta forma, notou-se uma apreciável semelhança inversa da distribuição espacial entre MI2 com MSF, ou seja, nas áreas onde a MI2 foi menor, a produtividade de massa seca da forragem foi maior, e vice-versa. De forma a corroborar esse fato, também apresentaram relativa semelhança espacial com a MSF os seguintes atributos do solo: MI3 (Fig. 13f), MIM (Fig. 13h), PT1 (Fig. 14a), DS1 (Fig. 14b), RP1 (Fig. 15a) e a UG3 (Fig. 15f).

### 4.3.2. Análise semivariográfica cruzada

#### 4.3.2.1. Ajuste dos semivariogramas cruzados entre os atributos estudados

No Quadro 7 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico. No geral, entre todos os semivariogramas cruzados, o melhor deles foi estabelecido para o atributo MSF=f(RP1), uma vez que seu coeficiente de determinação espacial foi o maior (0,951), como também com a elevada dependência espacial de 99,7%.

Do ponto de vista agronômico, o maior interesse do Quadro 7 reside nas cokrigagens estabelecidas entre a MSF e os atributos do solo. Especificamente para esse caso, tais atributos ficaram estabelecidos na seguinte ordem decrescente: 1) MSF=f(RP1), 2) MSF=f(MI2), 3) MSF=f(MIM), 4) MSF=f(DS1), 5) MSF=f(MI3), 6) MSF=f(MA2), 7) MSF=f(PT1) e 8) MSF=f(UG3), cujos coeficientes de determinação espacial ($r^2$) foram respectivamente de 0,951; 0,890; 0,873;

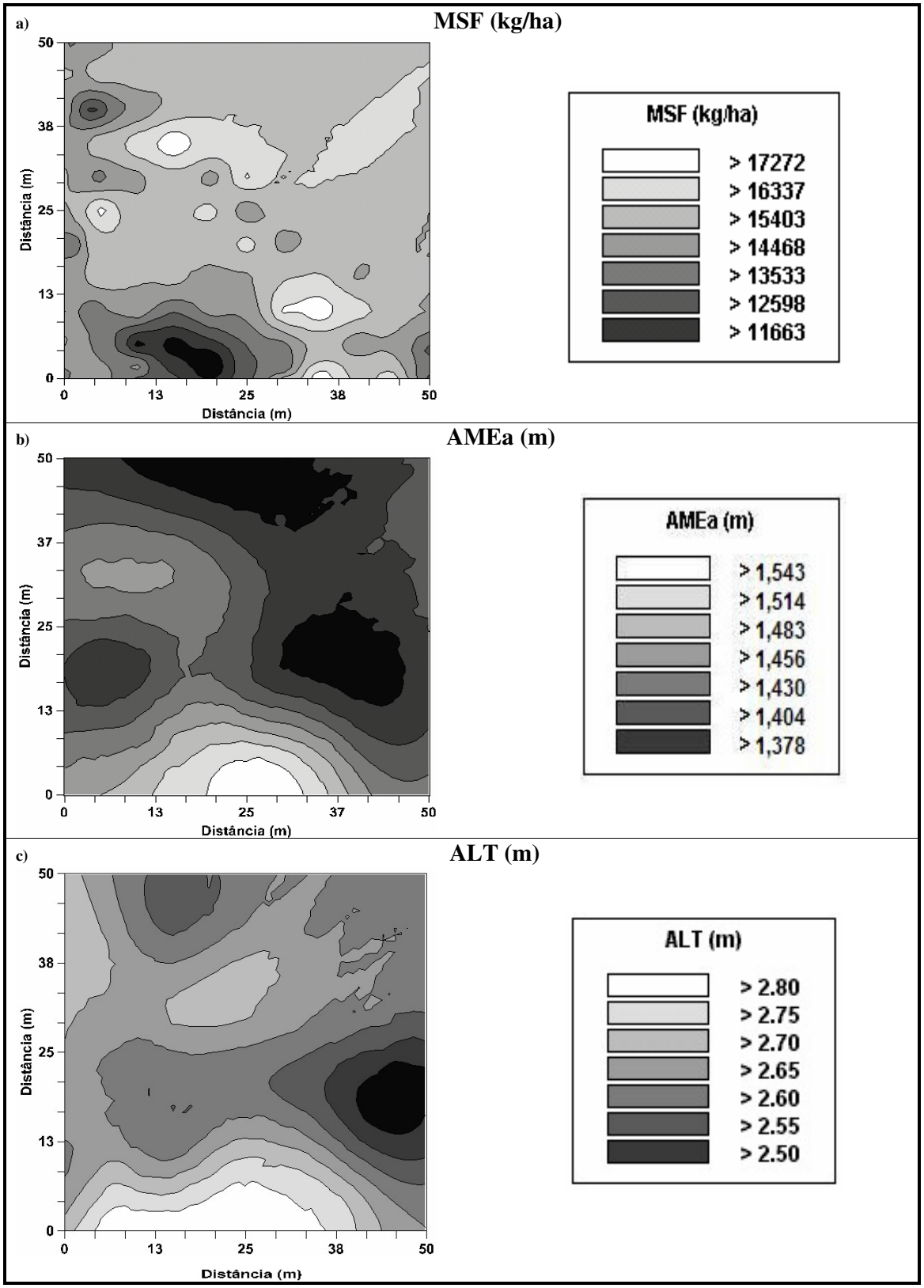


Figura 12: Mapas de krigagem dos atributos (MSF, AMEA e ALT) do milho em um Latossolo Vermelho Distrófico.

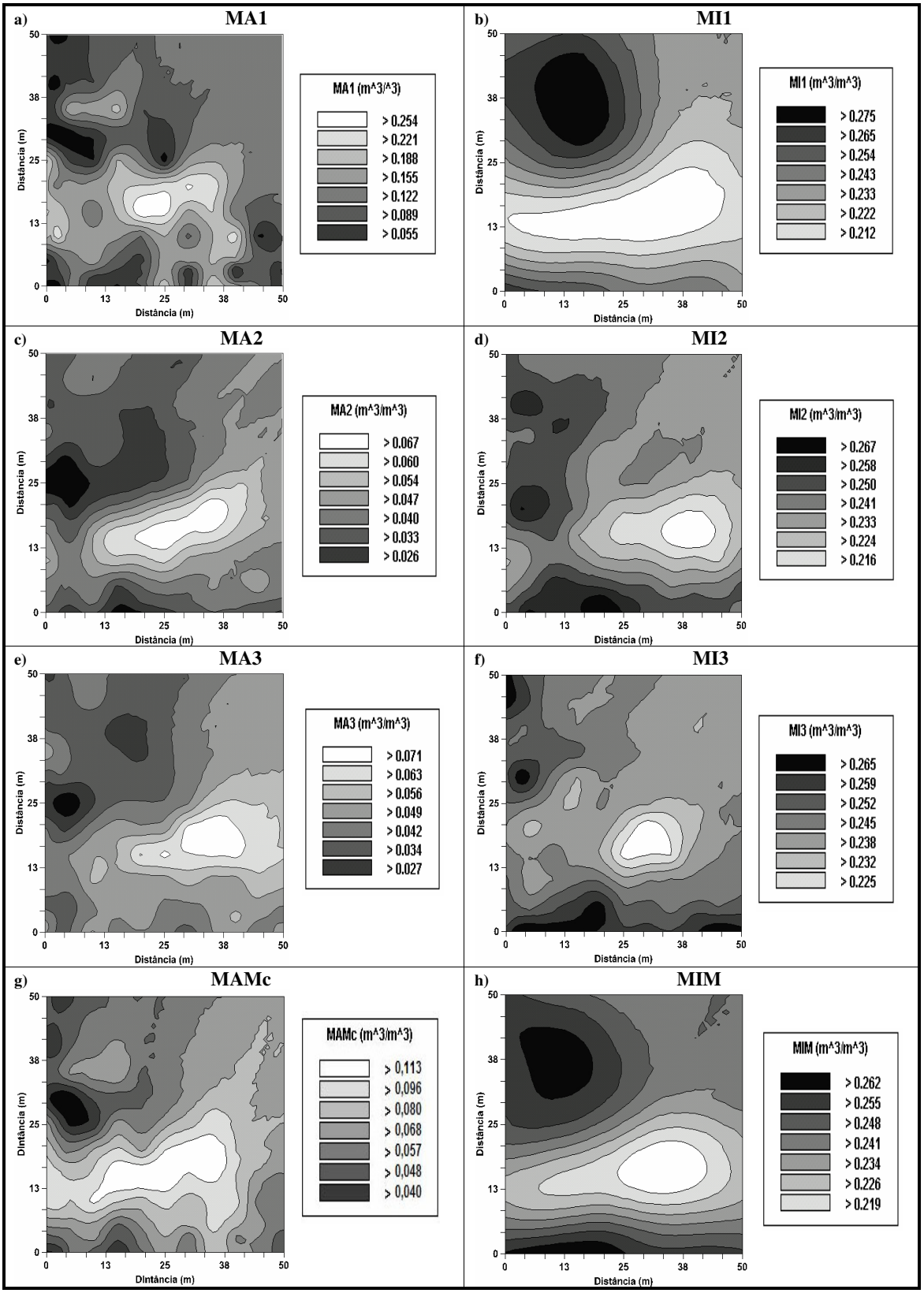


Figura 13: Mapas de krigagem dos atributos (MA1, MA2, MA3, MAMC, MI1, MI2, MI3 e MIM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

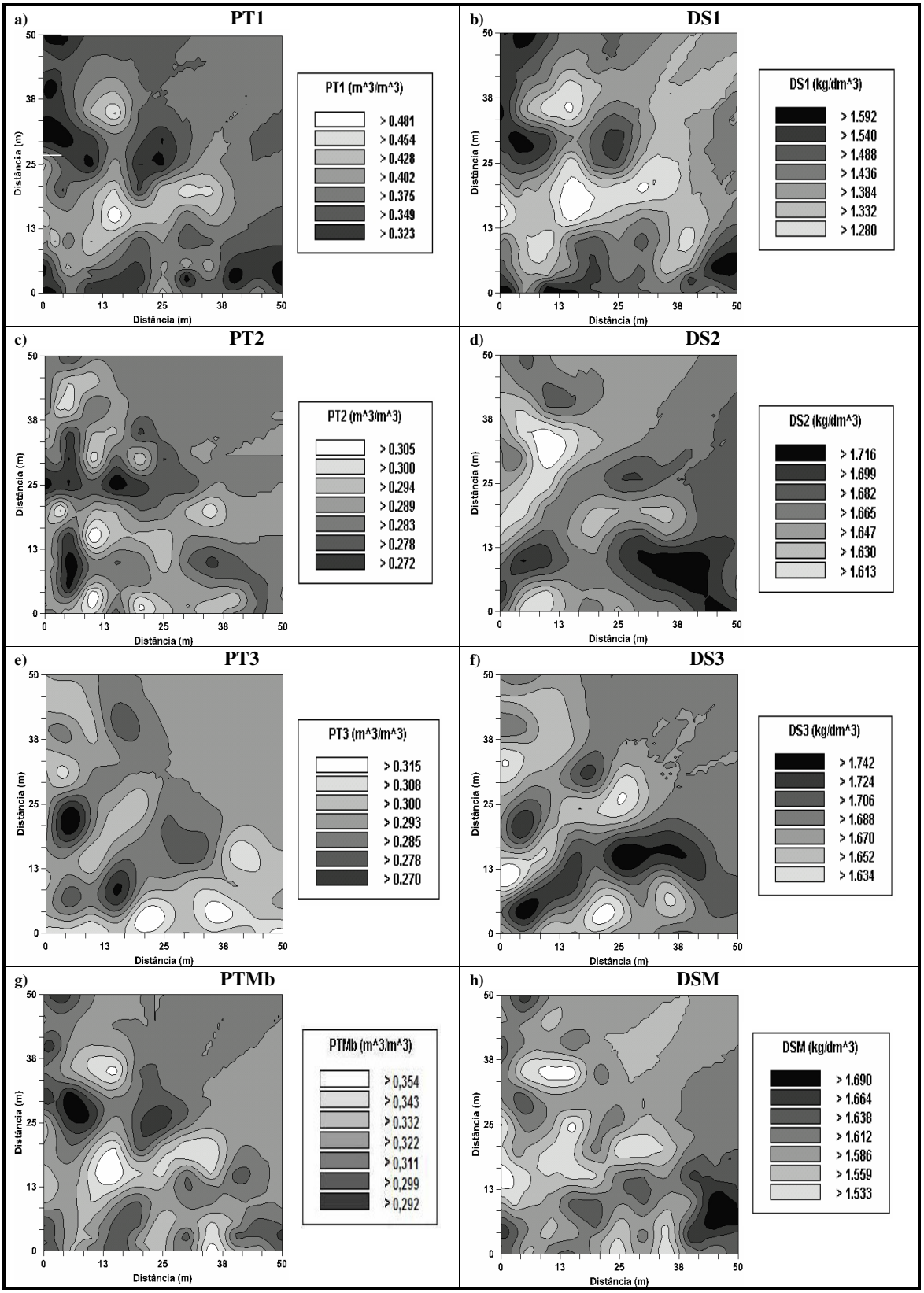


Figura 14: Mapas de krigagem dos atributos (PT1, PT2, PT3, PTMB, DS1, DS2, DS3 e DSM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

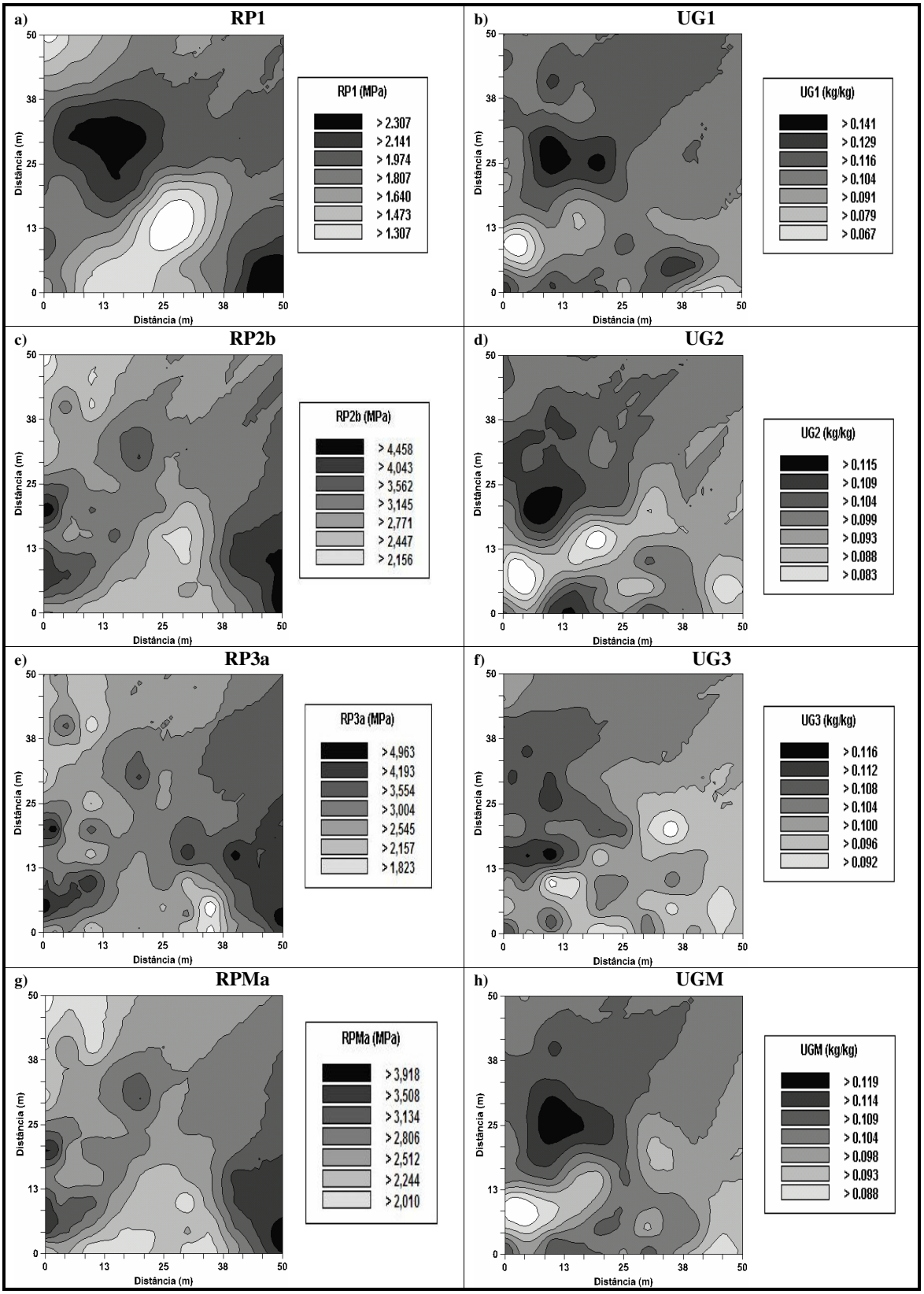


Figura 15: Mapas de krigagem dos atributos (RP1, RP2B, RP3A, RPMA, UG1, UG2, UG3 e UGM) de um Latossolo Vermelho Distrófico.

Quadro 7: Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| **Atributo** [(a)] | **Parâmetros** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Modelo [(b)] | Efeito Pepita ($C_0$) | Patamar ($C_0$+C) | Alcance (m) ($A_0$) | $r^2$ | SQR [(c)] | ADE [(d)] | Classe de dependência espacial |
| | | | ***γ(h) Cruzado entre atributos da planta e do solo*** | | | | | |
| **MSF=f (MA2)** | esf | $1{,}000.10^{-3}$ | $0{,}257.10^{1}$ | 19.2 | 0,544 | $5{,}590.10^{1}$ | 99,9 | alta |
| **MSF=f (MI2)** | gau | $-1{,}000.10^{-2}$ | $-1{,}739.10^{-1}$ | 17,99 | 0,890 | $4{,}04.10^{1}$ | 99,9 | alta |
| **MSF=f (MI3)** | gau | $-1{,}000.10^{-2}$ | $-0{,}816.10^{1}$ | 20,82 | 0,636 | $1.33.10^{2}$ | 99,9 | alta |
| **MSF=f (MIM)** | gau | $-1{,}000.10^{-2}$ | $-0{,}939.10^{1}$ | 20,47 | 0,873 | $3{,}850.10^{1}$ | 99,9 | alta |
| **MSF=f (PT1)** | gau | $1{,}000.10^{-2}$ | $2{,}729.10^{1}$ | 15,41 | 0,536 | $1{,}049.10^{3}$ | 99.9 | alta |
| **MSF=f (DS1)** | gau | $-1{,}000.10^{-1}$ | $-7{,}410.10^{1}$ | 16,45 | 0,675 | $0{,}699.10^{1}$ | 99,9 | alta |
| **MSF=f (RP1)** | gau | $0{,}100.10^{1}$ | $3{,}401.10^{2}$ | 26,66 | 0,951 | $9{,}953.10^{3}$ | 99,7 | alta |
| **MSF=f (UG3)** | esf | $1{,}000.10^{-2}$ | $0{,}364.10^{1}$ | 20,02 | 0,444 | $1{,}320.10^{1}$ | 99,7 | alta |
| **ALT=f (MI2)** | gau | $1{,}000.10^{-6}$ | $7{,}220.10^{-4}$ | 16,97 | 0,745 | $2{,}607.10^{-7}$ | 99,9 | alta |
| **ALT=f (RPMa)** [(e)] | gau | $-7{,}000.10^{-4}$ | $-4{,}700.10^{-3}$ | 19,05 | 0,593 | $1{,}292.10^{-5}$ | 85,1 | alta |
| | | | ***γ(h) Cruzado entre atributos do solo*** | | | | | |
| **PT1=f (MA1)** | esf | $3{,}000.10^{-4}$ | $3{,}940.10^{-3}$ | 15,37 | 0,833 | $1{,}819.10^{-6}$ | 92,4 | alta |
| **MA1=f (DS1)** | esf | $-5{,}100.10^{-4}$ | $-8{,}450.10^{-3}$ | 17,36 | 0,906 | $4{,}863.10^{-6}$ | 94,0 | alta |

[(a)] MSF = produtividade de massa seca da forragem, ALT = altura da planta, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, MIM = microporosidade média, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência mecânica à penetração, RPM = resistência mecânica à penetração média e UG = umidade gravimétrica, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; [(b)] exp = exponencial, gau = gaussiano, esf = esférico; [(c)] SQR = soma dos quadrados dos resíduos; [(d)] ADE = avaliador da dependência espacial; [(e)] atributo sucedido pela letra "a" teve o seu valor representado pelo logaritmo decimal dividido por 1.

0,675; 0,636; 0,544; 0,536 e 0,444, assim como com os avaliadores da dependência espacial variando entre 99,7 e 99,9%.

#### 4.3.2.2. Validação cruzada dos semivariogramas cruzados entre os atributos estudados

O Quadro 8 apresenta os parâmetros das validações cruzadas referentes às cokrigagens entre alguns atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Pereira Barreto –SP. Também nesse caso, o maior interesse deste quadro reside nas cokrigagens estabelecidas entre a MSF e os atributos do solo. Especificamente para esse caso, tais atributos ficaram estabelecidos na seguinte ordem decrescente: 1) MSF=f(MIM), 2) MSF=f(MI3), 3) MSF=f(MA2), 4) MSF=f(MI2), 5) MSF=f(PT1), 6) MSF=f(DS1), 7) MSF=f(RP1) e o 8) MSF=f(UG3), cujos coeficientes de correlação foram respectivamente de 0,500; 0,490; 0,471; 0,469; 0,464; 0,459; 0,445 e 0,385.

#### 4.3.2.3. Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem entre os atributos estudados.

As Figuras 16-18 apresentam os semivariogramas cruzados e os mapas de cokrigagens entre os atributos do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico. As cokrigagens logradas entre a MSF (variável primária) e os atributos do solo (variáveis secundárias) foram as seguintes: 1) Figura 16: MSF=f(MA2), MSF=f(MI2), MSF=f(MI3), MSF=f(MIM) e 2) Figura 17: MSF=f(PT1), MSF=f(DS1), MSF=f(RP1), MSF=f(UG3). Dessa forma, entre as oito referidas cokrigagens, seis delas apresentaram *lags* tanto no primeiro quanto no quarto quadrantes, denotando dualidade entre as variáveis primária e secundária, isto é, com a indefinição da variação espacial da MSF, se direta ou inversa com o atributo do solo. Tais cokrigagens foram a MSF=f(MA2), MSF=f(MI3), MSF=f(MIM), MSF=f(PT1), MSF=f(DS1) e a MSF=f(RP1). Contudo, duas delas apresentaram *lags* num único quadrante, as quais foram a MSF=f(MI2) e a MSF=f(UG3). Dessa forma, a primeira (Fig. 16c,d), por apresentar *lags* apenas no quarto quadrante, espacialmente falando ficou evidenciado que com a diminuição da MI2 ocorrerá um aumento da MSF, com uma probabilidade de 89,0%. Analogamente, a segunda (Fig. 17g,h), por apresentar *lags* apenas no primeiro quadrante, espacialmente falando ficou evidenciado que com o aumento da UG3 ocorrerá o mesmo com a MSF, com uma probabilidade de 44,4%. Assim, o atributo MI2, , quando comparado ao UG3 para a estimativa espacial da MSF, proporcionou um incremento de 44,6% a mais de probabilidade em tal fato, o qual pôde ser constatado pelos valores dos

Quadro 8: Parâmetros das validações cruzadas referentes às cokrigagens entre alguns atributos da produtividade de forragem do milho e de um Latossolo Vermelho Distrófico.

| **Atributo** [(a)] | **Coeficiente de correlação (r)** | **VO = a + b . VE** [(b)] | |
|---|---|---|---|
| | | a | b |
| | ***γ(h) cruzado entre atributos do solo e da planta*** | | |
| **MSF=f (MA2)** | 0,471 | $5,602.10^{3}$ | $6,320.10^{-1}$ |
| **MSF=f (MI2)** | 0,469 | $5,777.10^{3}$ | $6,200.10^{-1}$ |
| **MSF=f (MI3)** | 0,490 | $5,642.10^{3}$ | $6,260.10^{-1}$ |
| **MSF=f (MIM)** | 0,500 | $5,119.\ 10^{3}$ | $6,620.10^{-1}$ |
| **MSF=f (PT1)** | 0,464 | $6,261.10^{3}$ | $5,810.10^{-1}$ |
| **MSF=f (DS1)** | 0,459 | $5,966.10^{3}$ | $6,020.10^{-1}$ |
| **MSF=f (RP1)** | 0,445 | $6,244.10^{3}$ | $5,850.10^{-1}$ |
| **MSF=f (UG3)** | 0,385 | $6,834.10^{3}$ | $5,480.10^{-1}$ |
| **ALT=f (MI2)** | 0,729 | $3,900.10^{-1}$ | $8,560.10^{-1}$ |
| **ALT=f (RPMa)** [©] | 0,683 | $5,400.10^{-1}$ | $8,000.10^{-1}$ |
| | ***γ(h) cruzado entre atributos do solo*** | | |
| **PT1=f (MA1)** | 0,731 | $3,000.10^{-2}$ | $9,250.10^{-1}$ |
| **MA1=f (DS1)** | 0,591 | $6,000.10^{-2}$ | $4,850.10^{-1}$ |

[(a)] MSF = produtividade de massa seca da forragem, ALT = altura da planta, MA = macroporosidade, MI = microporosidade, MIM = microporosidade média, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência mecânica à penetração, RPM = resistência mecânica à penetração média e UG = umidade gravimétrica, e sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20 m) e 3 (0,20-0,30 m) suas respectivas profundidades; [(b)] VO = valor observado e VE = valor estimado; [(c)] atributo sucedido pela letra "a" teve o seu valor representado pelo logaritmo decimal dividido por 1.

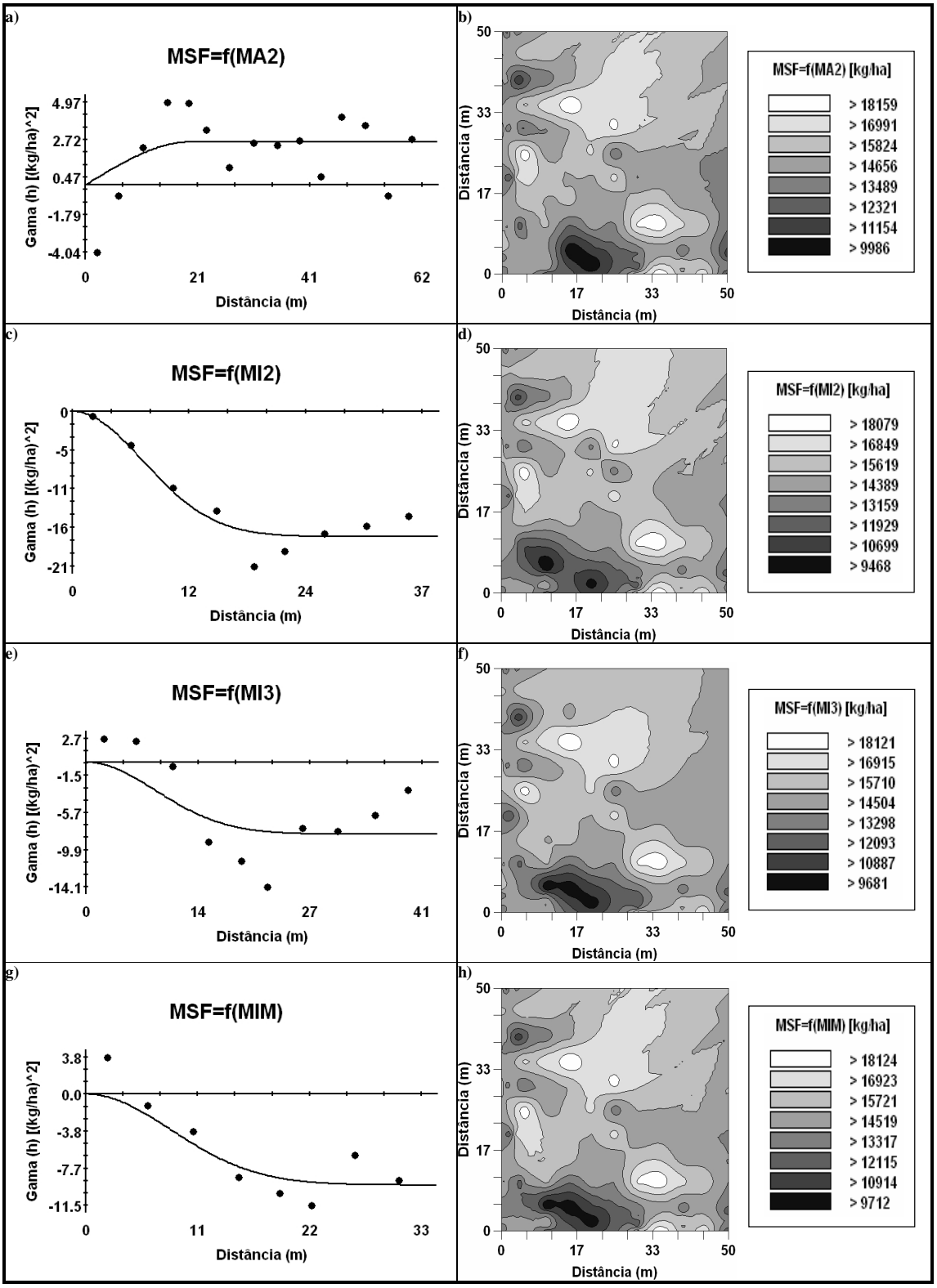


Figura 16: Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade de massa seca da forragem do milho (MSF) em função da macroporosidade (MA2) e da microporosidade (MI2 e MIM) em um Latossolo Vermelho Distrófico.

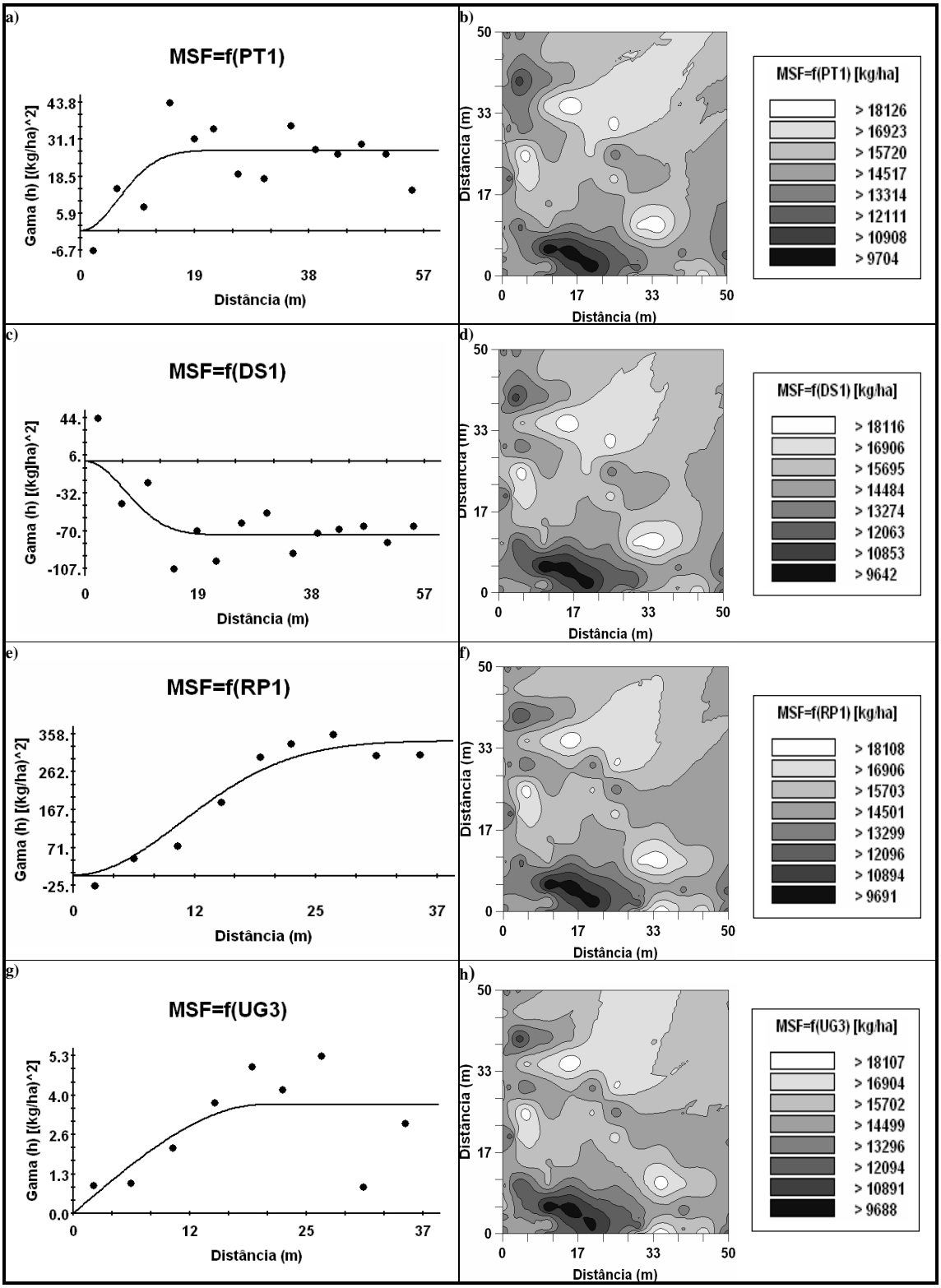


Figura 17: Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade de matéria seca da forragem do milho (MSF) em função da porosidade total (PT1), densidade do solo (DS1), resistência mecânica à penetração (RP1) e umidade gravimétrica (UG3) em um Latossolo Vermelho Distrófico.

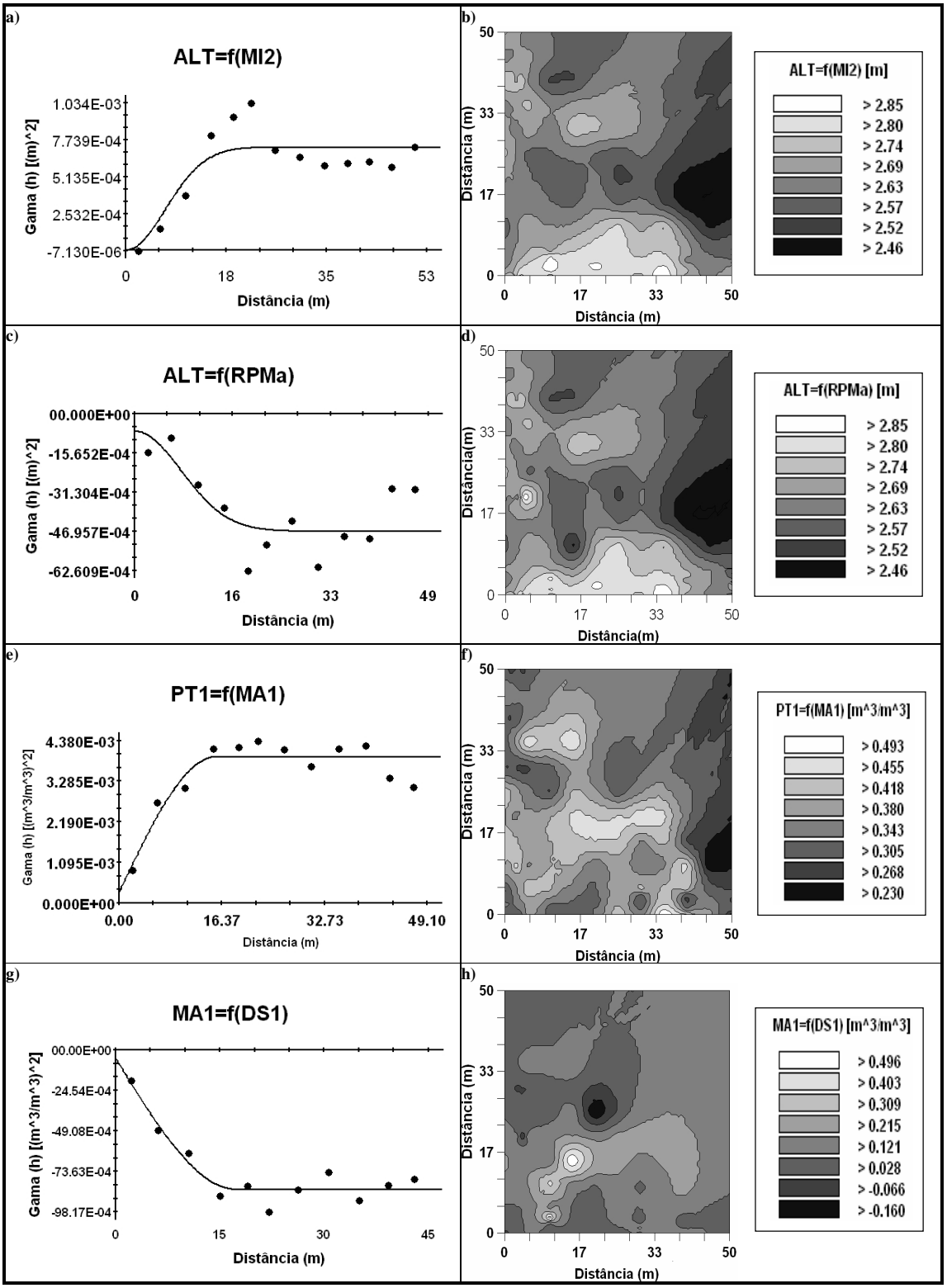


Figura 18: Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da altura de plantas do milho (ALT) em função da microporosidade (MI2) e resistência mecânica à penetração (RPMa); da porosidade total (PT) em função da macroporosidade (MA1), e da macroporosidade (MA1) em função da densidade global (DS1) em um Latossolo Vermelho Distrófico.

coeficientes de determinação espacial presentes no Quadro 7, isto é, de 0,890 para o MSF=f(MI2) e de 0,444 para o MSF=f(UG3). Portanto, baseado na superioridade do MI2 quando destinado à produtividade da MSF, pôde-se perceber, com uma probabilidade de 89,0%, analisando-se conjuntamente as Figuras 12a e 13d, que nos sítios onde a MI2 aumentou, com valores entre 0,241-0,267 $m^3/m^3$ (regiões noroeste, oeste, sul e sudoeste da Fig. 13d), a MSF (Fig. 12a) assumiu os menores valores (11663-14468 kg/ha). Em contrapartida, naqueles onde a MI2 diminuiu, com valores entre 0,216-0,241 $m^3/m^3$ (regiões norte, nordeste, leste e sudeste da Fig. 13d), a MSF (Fig. 12a) assumiu os maiores valores (14468-17272 kg/ha). Assim sendo, exclusivamente do ponto de vista espacial da área experimental trabalhada, a MI2 apresentou-se como o melhor atributo indicador da qualidade física do solo estudado, quando destinado à produtividade de massa seca da forragem de milho para as condições da Fazenda Bonança de Pereira Barreto (SP).

## 5. CONCLUSÕES

Face ao exposto, a presente pesquisa, realizada num Latossolo Vermelho Distrófico da Fazenda Bonança (Agropecuária Dahma), pertencente ao município de Pereira Barreto (SP), com os materiais e métodos empregados, e em decorrência dos resultados obtidos, analisados e interpretados, possibilitou as conclusões a seguir apresentadas:

1) No geral, os atributos estudados, da planta e do solo, além de não terem variado aleatoriamente, apresentaram variabilidade entre baixa e muito alta. Desta forma, seguiram padrões espaciais claramente definidos, com alcances da dependência espacial entre 6,6 e 31,1 metros. Portanto, a máxima distância que poderá assegurar extrema semelhança em magnitude, para um atributo qualquer, investigado para aquele local e solo, e que poderá alimentar os pacotes computacionais voltados à agricultura de precisão, deverá ser de 31,1 metros;

2) A correlação linear entre a produtividade de forragem do milho com a microporosidade do solo foi baixa, mas extremamente significativa. Do ponto, de vista espacial, houve elevada correlação inversa entre tais variáveis. Onde a microporosidade apresentou seus maiores valores, a produtividade de forragem do milho foi menor, sendo perfeitamente verdadeiro o inverso, e

3) A microporosidade do solo, avaliada na camada subsuperficial, apresentou-se como indicador da qualidade física do solo, quando destinado à produção de forragem do milho.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p.275-282, 2003.

ARAUJO, A.V. **Variabilidade espacial de propriedades químicas e granulométricas do solo na definição de zonas homogêneas de manejo**. 2002. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 29, p.425 -425, 2005.

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

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Fisica del suelos**. Mexico: Hispano-americana, 1973. 529 p

BORGHI, E. **Comportamento da cultura do milho (*Zea mays L.*) em diferentes sistemas de manejo do solo, população de plantas e adubação**. Ilha Solteira, 2001. 97p. (Trabalho de Graduação) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

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.

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

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico hídrico de um podzólico vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 34, n. 2, p.257-265. 1999.

CARVALHO, G.J.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; MARTINS, M.V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **R. Bras. Eng. Agr. Amb**., Campina Grande, v. 10, n. 3, p.765-771, 2006.

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

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

CARVALHO, O.S.; GASCÓ, J.M.; LOPÉZ, F.G.; REQUEJO, A.S. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p.497-503, 1998.

CARVALHO, T.M. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo através da geoestatística**. 1991. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1991.

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, R.D.; GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **R. Bras. Eng. Agr. Amb.**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p.239-246, 2001.

CRUZ, J.C., PEREIRA FILHO, I.A.; RODRIGUES, J.A.S.; FERREIRA, J.J. (Eds.) **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 544 p.

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

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. (numeração capitulada).

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

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

FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P.; PIZZINATTO, M.A.; BETTI, J.A.; MELO, A.M.T.; DEMARIA, I.C.; FURLANI, A.M.C. **Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. Boletim 200. 6ª ed. CAMPINAS, SP: INSTITUTO AGRONÔMICO, 1998. 396 p.

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

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

FREDDI, O.S. **Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho**. 2007. 105f. (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Jaboticabal, 2007.

GENRO JÚNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, n.3, p. 477-484, 2004.

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

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 37, n.2, p. 223-227, 2002

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

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU - Núcleo de Estudos Estatísticos e Biomédicos, 2004. 77 p.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long term experiments with different depths of moldboard plough in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amterdan, v.46, n.3-4, p.209-230, 1998.

HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. Os solos agrícolas. Rio de Janeiro: Forense-Universitária; São Paulo, Universidade de São Paulo, 1976. 334p.

IMHOFF. S.; SILVA, ªP.da.; TORMENA, C.A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v.37, n.7, p.1493-1500, 2000.

JOHANN, J.A; OPAZO, M.A. U; SOUZA, E.G.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p.212-219, 2004.

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

KRIGE, D.G.A. Statistical approach to some basic evaluation problems on the Witwatersrand. **Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, Witwatersrand, v. 52, n. 6, p.119-139, 1951.

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

KURAMOTO, C.M. Resposta da cultura do milho (Zea mays L.) à adubação nitrogenada, sob semeadura direta. Monografia – Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Ilha Solteira, 1999.

LIBARDI, P.L.; PREVEDELLO, C.L.; PAULETTO, E.A.; MORAES S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.2, p.85-90, 1986.

LIMA, R.C. **Modos e épocas de adubação da cultura do milho em plantio direto e cultivo mínimo**. 2005. 49f. Monografia - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Ilha Solteira, 2005.

MACEDO, J.R.; OTONNI FILHO, T.B.; MENEGUELLI, N.A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Seropédica, RJ. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.33, n. 12, p.2043-2053, 1998.

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

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

MELLO FILHO, J.F.; OLIVEIRA, A.S.; LOPES, L.C.; VELLAME, L.M. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo coeso dos tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 30, n. 2, p.199-205, 2006.

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

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

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

MILANI, D.I.C.; MILANI, L.; TAVARES, M.H.F.; URIBE-OPAZO, M.A., VILAS BOAS, M.A. Variabilidade Espacial da Porosidade do Solo em um Latossolo Sob Plantio Direto. In: 3° SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. ***Anais…*** Sete Lagoas, 2005. (CD ROM e Internet).

NUSSIO, L.G. Cultura de milho para produção de silagem de alto valor alimentício. In: 4º SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS. Piracicaba: FEALQ, 1991. ***Anais…*** Piracicaba, 1991. (Impresso).

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

PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

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

PREVEDELLO, B.M.S. **Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta**. 1987. 166 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

QUEIROZ, J.E.; CRUCIANI, D.E.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial da porosidade drenável de um solo de várzea, no município de Piracicaba, estado de São Paulo. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p.135-139, 1999.

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

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia.** base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa: Neput, 2002. 338 p.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

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

RODRIGUES, J.B.T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos do solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

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 Sci**., Maringá. n. 3, v. 28, p. 313-321, 2006.

SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E.; VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p.287-295, 2005.

SCHAFFRATH, V.R. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e de variáveis de plantas daninhas em sistemas de manejo de solo**. 2006. 91 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Paraná, Maringá, 2006.

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

SECCO, D.; ROS, C.O.; SECCO, J.K.; FIORIN, J.E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p. 407-414, 2005.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v.52, n.3-4, p.591-611, 1965.

SILVA, V.R.; REICHERDT, J,M.; STORCK, L., FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho um sistema Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6. p. 1013-1020, 2003.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2000. 209 p.

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

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

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p.367-372, 1997.

SOUZA, Z. M.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, T.G.; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p.51-58, 2004.

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

TAKEDA, Y.E. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 2000. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.301-309, 1998.

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

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

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v.15, n.1, p.105-111, 1991.

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

VERONEZE Jr., V. **Produtividade de milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional**. 2004. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2004.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, A.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Comp.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; GONZALEZ, A.P. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n.1, p. 127-138, 2003.

ZASLAVSKY, D.; ROGOWSKI, A.S. Hidrologic and morphologic inplications of anisotropy and infiltration in soil profile development. **Soil Science Society American Proc.**, v.33, n.4, p.594-599, 1969.

ZIMBACK, C.R.; CATANEO, A. Variabilidade espacial das características físicas de solos. In: AVANCES EN EL MANEJO DEL SUELOS Y AGUA EM LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA. La Plata, 1998. ***Anais...*** La Plata: UNLP, 1998, p.132-137.

# Livros Grátis

( http://www.livrosgratis.com.br )

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo