



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA**

**VINÍCIUS RIBAMAR ALENCAR MACEDO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO  
AMARELO DISTROCOESO**

**São Luís - MA**  
**2014**

VINÍCIUS RIBAMAR ALENCAR MACEDO

Engenheiro Agrônomo

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO  
AMARELO DISTROCOESO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura

**São Luís - MA**

**2014**

VINÍCIUS RIBAMAR ALENCAR MACEDO

Engenheiro Agrônomo

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO  
AMARELO DISTROCOESO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado  
do Programa de Pós-Graduação em  
Agroecologia da Universidade Estadual do  
Maranhão, para obtenção do título de Mestre em  
Agroecologia.

Dissertação defendida e aprovada em : \_\_\_/ \_\_\_ / 2014

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura (Orientador)**

Doutor em Agronomia

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

---

**Prof. Dr. Fabrício Brito Silva (1º examinador)**

Doutor em Sensoriamento Remoto

Universidade CEUMA

---

**Prof. Dr. Altamiro Souza de Lima Ferraz Junior (2º examinador)**

Doutor Agronomia

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer ao grande criador, Senhor Deus agradeço a ti por esta vitória.

A toda minha família, pelo apoio e incentivo dado em todas as etapas de minha vida. Especialmente a minha Mãe, **Antonia Neta Alencar Macedo**, e meu **Pai José Ribamar Macedo Filhos**, pelo amor incondicional, educação, valores e princípios que me norteiam, minhas irmãs, **Thauane Macedo, Suzana Macedo e Fernanda Macedo**.

Quero agradecer a minha namorada **Leticia Monteiro** pelo apoio nos momentos difíceis e por compartilhar os momentos de alegria.

Agradeço imensamente aos professores e colaboradores do Curso de Agronomia, em especial a professora Dra. **Josiane Marlle Guissem**, e Pós-graduação e Agroecologia pela contribuição na minha formação profissional e amizade.

Quero agradecer em especial ao Professor Dr. **Emanoel Gomes de Moura**, pelas oportunidades, incentivos, e como sempre preocupados com o bom desenvolvimento pessoal dos seus orientados, incentivando a busca por conhecimento e contribuindo para a minha formação profissional.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio nas atividades de campo e laboratório. Em especial **Clemeson Vale, Leandro Rocha, Ivan Lino, Virley Sena, Mariana, Francielle Rodrigues, Dionísio, Carlos César, Danubia Dadalto, Marta Jordana, Mariana Corrêa, João Araújo, Josael Monteiro, Muniz Neto, Marcio Leite e membros do grupo de pesquisa em Agroecologia Econous**.

Aos integrantes da Associação de Caprinocultores, União, do povoado Acampamento.

Obrigado a todos!

*“A persistência é o menor caminho do êxito”*

*(Charles Chaplin)*

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I .....	09
<b>VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO COMO FERRAMENTA PARA INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA DA AGRICULTURA</b>	
<b>1. Introdução Geral .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Referencial Teórico.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Intensificação Ecológica da Agricultura.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Qualidade física do solo.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Geoestatística.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.....</b>	<b>20</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>23</b>
 CAPÍTULO II .....	 28
<b>VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO</b>	
<b>Resumo.....</b>	<b>29</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>30</b>
<b>Material e Métodos.....</b>	<b>32</b>
<b>Local do experimento.....</b>	<b>32</b>
<b>Atributos físicos do solo.....</b>	<b>33</b>
<b>Atributos de produtividade da cultura do milho.....</b>	<b>34</b>
<b>Análise Geoestatística.....</b>	<b>34</b>
<b>Metodologia para o cálculo de IAF.....</b>	<b>36</b>
<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>55</b>
<b>Referências.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1:** Parâmetros do semivariograma.....17
- Figura 2.** Modelos do semivariograma experimental.....18

### CAPÍTULO II

- Figura1.** Mapa da área de estudo.....39
- Figura 2** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da densidade do solo (A), porosidade total (B), percentagem de saturação (C) e macroporosidade (D) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....44
- Figura 3** Mapas de isolinhas da distribuição espacial dos teores de areia fina (A), areia grossa (B), argila (C) e silte (D) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....45
- Figura 4** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da resistência a penetração nas profundidades 0 – 5 cm (A), 6 – 10 cm (B), 11 – 15 cm (C), 16 – 20 cm (D), 0 – 20 cm (E) e umidade no momento da amostragem (F) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....47
- Figura 5** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da pressão máxima (A) e profundidade da pressão máxima (B) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....48
- Figura 6** Mapas de isolinhas da distribuição espacial do índice de avaliação física de um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....49
- Figura 7** Mapas de isolinhas da distribuição espacial dos componentes de produtividade do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....50
- Figura 8** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da produtividade do milho (A) e pressão máxima (B), nos sistemas com leguminosa (leucena) e sem leguminosa, em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Avaliação de diferentes parâmetros físicos do solo para o cultivo de milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....	36
<b>Tabela 2</b> Parâmetros da estatística descritiva dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....	39
<b>Tabela 3</b> Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....	42
<b>Tabela 4.</b> Matrix de correlação entre atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho, nos sistemas com leguminosa (leucena) e sem leguminosa, em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.....	53



**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO COMO  
FERRAMENTA PARA INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA DA AGRICULTURA**

---

**CAPÍTULO I**

## 1. Introdução geral

A agricultura de precisão ou manejo de *sites* específicos procura identificar, analisar e gerenciar a variabilidade espacial e temporal dentro de campos agrícolas, a fim de otimizar a rentabilidade, sustentabilidade e proteção do meio ambiente (MZUKU et al., 2005). Potencialmente, o uso de algumas práticas de agricultura de precisão pode contribuir para melhorar a eficiência da produção e diminuir o impacto ambiental (ORTEGA; SANTIBÁÑEZ, 2007).

As zonas de manejo de sites específicos podem ser utilizadas como ferramenta para diminuir o fosso entre os rendimentos agrícolas médios e o teto de rendimento potencial das culturas, de forma que a agricultura possa atender a demanda crescente de alimentos, objetivo da intensificação ecológica da agricultura. A intensificação ecológica da Agricultura pode ser definida como produzir mais alimento por unidade de utilização de recursos, minimizando o impacto da produção de alimentos no ambiente (HOCHMAN et al., 2013). CASSMAN (1999) relacionou três pilares para a intensificação ecológica da produção de cereais: potencial de produção, agricultura de precisão e qualidade do solo.

A mensuração da qualidade do solo é considerada importante para a avaliação da extensão da degradação ou melhoria da terra e para a identificação de práticas de manejo que promovam o uso sustentável da terra (ROLDÁN et al., 2003). A qualidade do solo é composta por três aspectos principais de qualidade, o biológico, físico e químico, e como os biológicos que afetam os processos físicos do solo, tais como o movimento da água e aeração, assim como os processos químicos. Por isso, desempenham um papel central no controle da qualidade do solo (DEXTER, 2004; TOPP et al., 1997).

Dentre os indicadores de qualidade do solo, a qualidade física do solo pode ser descrita de muitas maneiras diferentes. A densidade, porosidade e resistência a penetração mostram os níveis de compactação do solo e influenciam a enraizabilidade (JONES, 1983) indicando variabilidade do solo e resposta à lavoura as variações. Estes indicadores de qualidade do solo estão relacionados uns aos outros, porque todos eles são bem correlacionados com a estrutura do solo (LI et al., 2011).

A caracterização da variabilidade espacial das propriedades do solo é essencial para a compreensão dos efeitos do manejo da terra em função do solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

Como o solo é um continuum, suas propriedades espaciais têm de ser autocorrelacionados em uma determinada escala (OLIVER; WEBSTER, 1991). O estudo da dependência espacial de atributos do solo, por meio da teoria das variáveis regionalizadas ou geoestatística, permite a interpretação e a projeção dos resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, podendo indicar alternativas de uso, além de possibilitar melhor compreensão da variabilidade dos atributos e sua influência sobre a produção das culturas (OLIVEIRA, 2007).

Como o conceito de agricultura de precisão vem ganhando importância há uma necessidade de apresentação de um processo de avaliação da variação espacial da saúde física do solo correlacionando-a com a variação no rendimento das culturas, para este efeito, os mapas das propriedades físicas mostram-se importantes (AMIRINEJAD et al., 2011). Este trabalho parte da hipótese de que os atributos físicos do solo são limitantes a produtividade do milho e que dentro do campo encontram-se diferentes zonas que afetam o desempenho das culturas, o que aumenta o fosso entre a produtividade alcançada e a potencial. Por isso, esse estudo teve como objetivo subsidiar a intensificação ecológica da agricultura por meio do delineamento de sites que merecerão manejos específicos posteriores.

## **2. Referencial teórico**

### **2.1 Intensificação ecológica da Agricultura (IEA)**

A intensificação ecológica da Agricultura (IEA) pode ser definida como produzir mais alimento por unidade de utilização de recursos, minimizando o impacto da produção de alimentos no ambiente (HOCHMAN et al., 2013). O conceito de intensificação ecológica foi cunhado por CASSMAN (1999) para definir o conjunto de princípios e os meios necessários para aumentar a produtividade primária nos principais agroecossistemas de cereais do mundo. A IEA exige que a agricultura satisfaça o aumento da demanda prevista para alimentar com impactos ambientais mínimos negativos. Os conceitos de agricultura ecoeficiente foram recentemente revisados por KEATING et al. (2010) que descreveram a ecoeficiência como multidimensional e influenciada por múltiplos fatores que interagem em formas não lineares e não aditivos. Não há dúvida sobre a relevância do conceito para orientar o desenho de sistemas agrícolas: produzir mais com menos

entrada externa, mantendo um ambiente saudável, que fornece vários serviços (TITTONELL; GILLER, 2013).

A ênfase da intensificação ecológica da agricultura foi colocada no aumento da capacidade de rendimento das principais culturas, estreitando as lacunas de produtividade por meio da implementação de formas de agricultura de precisão, contando com os avanços científicos no campo da fisiologia das plantas, ecofisiologia de plantas e ciência do solo (TITTONELL; GILLER, 2013). No entanto, pouco tem sido escrito sobre a forma de alcançar esse objetivo. Esforços únicos que abordam os vários desafios que a agricultura atual enfrenta têm sido muitas vezes feitos de forma isolada em vez de holística.

Estima-se que em 2050 a quantidade de terra arável se expandirá por menos de 5%; conseqüentemente, 90% do crescimento da produção agrícola terá de vir de maiores rendimentos por hectare e aumento da intensidade de cultivo (de 84% em 2000 para 92% em 2050) (FISCHER, 2009). A falta de terras aptas à expansão agrícola é um argumento importante para a intensificação ecológica da agricultura, no entanto, IEA nega em grande parte o argumento de que a intensificação da agricultura está poupando a terra para a natureza (BALMFORD et al., 2005) ou evitando significativamente os gases de efeito estufa (BURNEY et al., 2010). Ambos os argumentos são baseados em um cenário alternativo em que a quantidade de terra utilizada pela agricultura iria ou vai expandir drasticamente.

O sucesso da intensificação ecológica da agricultura dependerá de sustentar aumentos de produção nos principais sistemas de cereais de sequeiro e áreas irrigadas por causa das oportunidades limitadas de expansão (TITTONELL; GILLER, 2013). Práticas de manejo modernas tiveram maior impacto sobre os rendimentos em sistemas irrigados, como o arroz de alta produção e sistemas de trigo na Ásia, e em ambientes de sequeiro, onde ambos, clima e qualidade do solo, são favoráveis para o crescimento das plantas, como sistemas de trigo no noroeste da Europa e sistemas à base de milho na América do Norte (CASSMAN, 1999).

Em vez disso, o aumento da quantidade de água disponível para as plantas por unidade de chuva devido as melhorias no solo e manejo de resíduos que aumentam a infiltração e reduzem o escoamento, terá muito mais impacto sobre a produtividade e estabilidade de produção do que pode ser esperado de melhoramento genético (GOVAERTS et al., 2006). As maiores oportunidades para o aumento de rendimento sustentado de intensificação são encontradas em sistemas de sequeiro favoráveis e irrigadas que apresentam rendimentos agrícolas médios,

constituem menos de 70% do potencial de produção (HOCHMAN et al., 2013). O fosso entre os rendimentos agrícolas médios e o teto de rendimento potencial precisa diminuir para que a agricultura possa atender a demanda de alimentos.

O fosso entre os rendimentos médios alcançados pelos agricultores e a produtividade potencial é determinado pela capacidade de rendimento de variedades ou híbridos disponíveis e de quanto as práticas de manejo das culturas e do solo em permitem a expressão desse potencial genético (CASSMAN, 1999). A manutenção de uma diferença de rendimento considerável é crucial para sustentar aumentos constantes na produtividade média das culturas.

Ao analisar as inovações potencialmente levando em conta o crescimento da produtividade na agricultura de sequeiro, CARBERRY et al. (2011) empregaram o quadro de retorno de risco para nomear as tecnologias que pudessem gerar novas eficiências de produção e diminuir as ineficiências do sistema, aumentar a eficiência da utilização de recursos, agricultura de precisão, ou gerar novos potenciais de rendimento, melhoramento genético. CASSMAN (1999) relacionou três pilares para a intensificação ecológica da produção de cereais: potencial de produção, qualidade do solo e agricultura de precisão.

A agricultura de precisão tem o potencial para satisfazer a maior parte dos atributos desejáveis da IEA, pois pode ser utilizada para melhorar a eficiência com a qual os nutrientes são usados e para aumentar os rendimentos, permitindo que os agricultores deixem em pousio áreas não rentáveis para aumentar a biodiversidade na exploração (HOCHMAN et al., 2013).

## **2.2 Qualidade Física do solo**

O conceito de qualidade do solo por si só foi introduzido por WARKENTIN (1995) como uma abordagem para facilitar um melhor planejamento do uso da terra para múltiplas funções. A qualidade do solo foi definida por DORAN e PARKIN (1994) como a capacidade do solo de funcionar de forma eficaz no presente e no futuro, ou como a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a sanidade vegetal e animal.

A capacidade do solo para funcionar como um componente de um ecossistema pode ser degradada, melhorada ou sustentada em função da resposta ao uso e manejo (MOHANTY et al., 2007). Por exemplo, as práticas de conservação da lavoura geralmente resultam em maior

quantidade de matéria orgânica do solo, redução da erosão, aumento da infiltração e aumento de agregados estáveis em água e maior teor de carbono e biomassa microbiana, quando comparadas aos sistemas de preparo convencional (REEVES, 1997). Na medida em que os índices de qualidade de solo estão em evidência, um certo número de metodologias têm sido empregadas, mas nenhuma foi aceita (BOUMA, 2002; GARDI et al., 2002).

A qualidade do solo envolve a interação de muitos fatores. Portanto para desenvolver práticas agrícolas sustentáveis, é necessário conhecer e compreender os efeitos do uso da terra sobre a qualidade do solo. A sustentabilidade está relacionada com a qualidade do solo, que é definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro de limites naturais ou manejados, para sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar o ar e qualidade da água e apoiar a saúde humana (KARLEN et al., 1997).

A qualidade do solo depende da medida em que um solo cumpre o papel a que se destina (SINGER; EWING, 2000). Segundo GOVAERTS et al., (2006) os indicadores mais explicativos da qualidade do solo são as condições físicas e acúmulo de nutrientes na camada superficial do solo. A qualidade do solo é um conceito difícil de definir e medir, apesar desta definição ampla, pode-se argumentar que as propriedades do solo específicas que apoiam a produtividade das culturas, tais como reservas de nutrientes, capacidade de retenção de água e estrutura favorável para o crescimento das raízes, são as mesmas propriedades que contribuem para os serviços ambientais que os solos fornecem (IMAZ et al., 2010).

A avaliação da qualidade do solo é melhor visualizada como um indicador integrado do manejo sustentável do solo, já que muitas vezes reflete a qualidade ambiental, segurança alimentar e questões econômicas (HERRICK, 2000). Com o solo como um recurso multifuncional (SINGER; ERWING, 2000), sua qualidade deve ser avaliada considerando as características do ecossistema e o objetivo principal para o qual a avaliação será feita (ANDREWS et al., 2004).

A avaliação da qualidade do solo deve levar em conta as propriedades, processos do solo e dinâmicas inerentes, deve ser holística, e considerar todos os processos e interações que ocorrem no solo (KARLEN et al., 2003). Para um site específico, a avaliação será influenciada por muitos fatores incluindo plantio direto, rotação de culturas, introdução de animais ou adubação verde e outros fatores de manejo, bem como clima e tipo de solo (IMAZ et al., 2010). O ideal é que a qualidade do solo seja fácil de medir, capaz de refletir mudanças em suas funções,

seja sensível às variações na gestão e acessível ao maior número possível de usuários (SHUKLA et al., 2006).

Propriedades do solo, tais como, tamanho e continuidade dos poros, a estabilidade de agregados e textura que juntos determinam a estrutura do solo, constituem atributos físicos indicadores da qualidade do solo (IMAZ et al., 2010). O ponto de partida para a avaliação da qualidade do solo é a seleção de indicadores, isto é, as propriedades do solo e processos que irão fornecer um conjunto mínimo de dados para avaliação (ANDREWS et al., 2004). Além disso, a natureza específica do local pode realmente necessitar de diferentes medições de propriedades do solo, dependendo do agroecossistema específico para o qual será feita a avaliação (GOVAERTS et al. de 2006; SHUKLA et al. de 2006).

Para os solos de textura mais fina, a atenção tem sido dada às relações entre a produção de milho e a resistência do solo/compactação, o teor de água do solo, o manejo e fertilidade do solo (TOPP et al., 2000). A compactação do solo é descrita como a diminuição da porosidade ou o aumento da densidade, como resultado do rearranjo das partículas (McKYES, 1985). A compactação do solo e o conteúdo de água no solo tem alta correlação, assim como as práticas de manejo que promovam a compactação do solo, podem reduzir a aeração, reduzir as taxas de decomposição de matéria orgânica, mobilidade e retenção de nutrientes e limitar o crescimento das raízes e por consequência afetar o rendimento das culturas (BOONE; VEEN, 1994), (VAN OUWERKERK; SOANE, 1994; TOPP et al., 2000).

A compactação em solos agrícolas é um problema grave porque diminui a fertilidade do solo (KILIÇ et al., 2004). O efeito de cada uma das alterações depende principalmente da textura do solo, em um solo arenoso, um aumento na densidade do solo e uma diminuição no teor de umidade volumétrica causam valores de alta resistência à penetração (RP). Enquanto isso, em solo argiloso, os valores de RP semelhantes dependem principalmente da densidade do solo (ALEXANDROU; EARL, 1998). Segundo (BRADFORD, 1986), para a maioria das culturas agrícolas, o crescimento das raízes diminui drasticamente quando há resistência à penetração superior a cerca de 2 MPa.

### 2.3 Geoestatística

A Geoestatística tem por base o conceito de função aleatória, e as propriedades do solo são consideradas como um conjunto de variáveis aleatórias espacialmente dependentes, ou seja, é uma tecnologia usada para estimar os valores das propriedades em locais não amostrados, que variam no espaço a partir de dados amostrais (OLIVER; WEBSTER, 1991). Essa tecnologia pode estimar um valor desconhecido, produzir um mapa e validar uma estratégia de amostragem e assim melhorar a amostragem, tornou-se um ramo da ciência na década de 1960 quando utilizado na indústria de mineração e posteriormente foi estendido para muitos outros campos, incluindo Geomorfologia, Geologia, Hidrologia e Geografia (MABIT; BERNARD, 2007).

Atributos do solo não são distribuídos aleatoriamente na paisagem, há uma correlação espacial que pode explicar a distribuição espacial das suas magnitudes (GOOVAERTS, 2001). Para representar essa correlação espacial das variáveis, as análises geoestatísticas devem ser utilizadas através de uma ferramenta específica, o semivariograma, pois esses métodos de geoestatística fornecem um conjunto de ferramentas estatísticas para incorporar as coordenadas espaciais e temporais de observações em processamento de dados (CRESSIE, 1993 e WACKERNAGEL, 1995).

O semivariograma é a ferramenta básica para a análise da estrutura espacial. Esta análise estrutural envolve descrição e modelagem do semivariograma estimado. O semivariograma é uma descrição matemática da relação (estrutura) entre a variância de pares de observações (pontos de dados) e a distância que separa estas observações (h). Ele descreve a variação populacional dentro de uma classe de distância eixo y de acordo com a distância geográfica entre os pares de populações (eixo x) (Figura 1).

A curva ajustada minimiza a variância dos erros, sendo que o modelo do semivariograma é utilizado para definir os pesos da função Krigagem (OLIVER; WEBSTER, 2014) e a semivariância é uma estatística de autocorrelação definida como:

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

Onde:  $\gamma(h)$  semivariâncias para a classe de alcance de distância ou lag alcance h .

$N(h)$  número total de pares de amostra ou pares de observações separadas por uma distância h .

$Z(x_i)$  valor medido da amostra no ponto i .



$Z(x_i + h)$  valor da amostra medida no ponto  $i + h$ .

O modelo do semivariograma pode ser descrito por meio de diferentes parâmetros (Figura 1): o  $(C_1 + C_0)$ , o efeito pepita ( $C_0$ ), a contribuição de  $(C)$  e o alcance ( $A$ ). A parte mais importante de um semivariograma é a sua forma perto da origem até ao alcance, como os pontos mais próximos ou quando é atribuído mais peso a um grupo de pares no processo de interpolação. O patamar corresponde ao modelo de assíntota (contribuição e efeito pepita) e deve ser igual ao da variância do conjunto de dados. O alcance é o valor de  $h$  na qual  $\gamma$  atinge o valor máximo, onde o patamar ocorre, e portanto representa a distância de separação ao longo do qual não ocorre mais dependência espacial (MABIT; BERNARD, 2007).

O efeito pepita representa o interceptor de  $\gamma$  para  $h = 0$ . É um valor diferente de zero produzido por diversas fontes de erro inexplicável (por exemplo, erros de medição, erro de amostragem e a variabilidade inexplicada e inerente) para  $\gamma$  quando  $h = 0$ . Isto representa uma indicação da variação da distância curta (MABIT; BERNARD, 2007). Para construir semivariogramas confiáveis, diferentes etapas têm de ser respeitadas, distâncias diferentes de defasagem tem que ser testadas até encontrar um número suficiente de pares para representar o modelo.

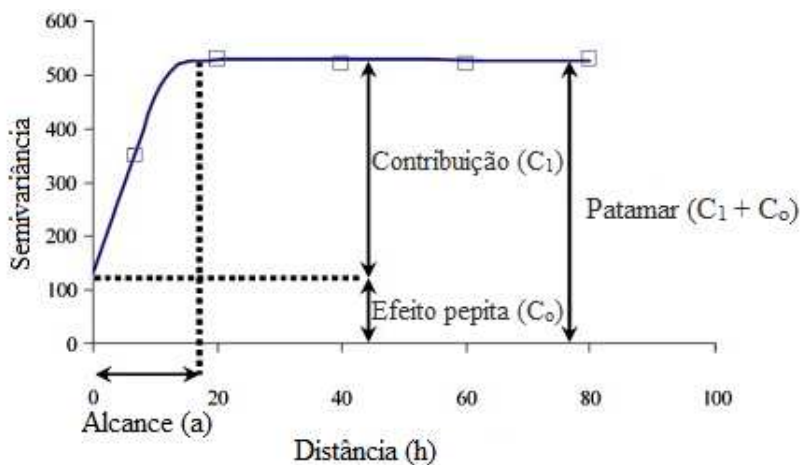


Figura 1: Parâmetros do semivariograma (MABIT; BERNARD 2007).

A distância efetiva de defasamento não pode ser maior do que metade da distância máxima entre os dados. A dependência direcional tem que ser testada na autocorrelação espacial, a característica do semivariograma tem de ser determinada em dependência isotrópica (sem dependência direcional) ou anisotrópica (com dependência direcional). Se não for encontrada anisotropia, isso significa que o valor da variável varia de forma semelhante em todos os sentidos

e a semivariância depende apenas da distância entre os pontos de amostragem (BURGOS et al., 2006; EMERY, 2006). Existem vários tipos de modelos: Exponencial, Gaussiano, Linear e Esférico (Figura 2).

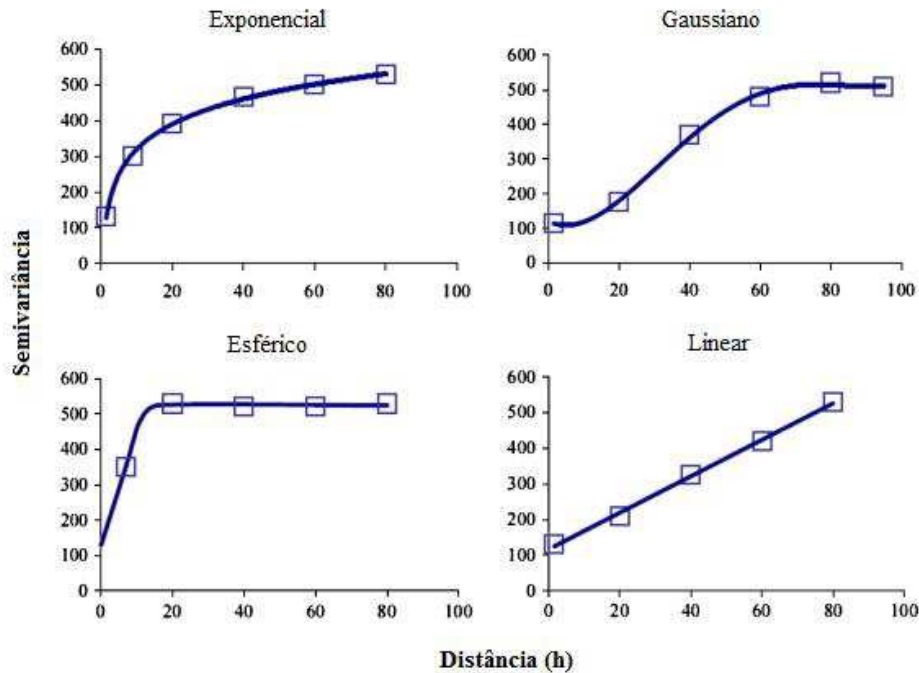


Figura 2. Modelos do semivariograma experimental (MABIT; BERNARD 2007).

Finalmente, o melhor modelo de semivariograma e seus parâmetros tem que ser determinado a fim de validar a modelagem da autocorrelação espacial por meio da otimização de parâmetros do semivariograma. Dois importantes indicadores podem ser utilizados: o coeficiente de correlação (indicação de quão bem o modelo se ajusta aos dados semivariogramas) e a relação contribuição para patamar [ $C_1 / (C_1 + C_0)$ ], o qual deve tender a 1. Isso significa que  $C_0$  (a pepita) deve tender a 0. Alguns autores também utilizam a relação pepita patamar [ $C_0 / (C_0 + C_1)$ ], que deve tender para 0. Se a relação de pepita/patamar é inferior a 25%, em seguida, a variável pode ser considerada como tendo uma forte dependência espacial. Se esta razão é de entre 25% e 75%, a dependência espacial será considerada moderada e se a razão é igual ou superior a 75%, em seguida, a dependência espacial será considerada fraca (CAMBARDELLA et al., 1994). Alguns softwares como o GS + (GAMMA SOFTWARE DESIGN, 2004) levam em conta a distância entre o grupo de pares e do modelo ajustado chamado de soma de quadrado do resíduo (SQR).

O número de pares em cada distância de defasagem tem de ser de preferência maior do que 30 para fornecer estimativas estáveis do semivariograma, o coeficiente de correlação ( $R^2$ )

deve ser maior do que 0,8 e a proporção efeito pepita patamar deve tender a 1, o que significa que a variação pepita tem de ser o mais perto possível para a origem (CAMBARDELLA et al. de 1994; DUFFERA et al., 2007). Obviamente, o semivariograma com a melhor redução SQR tem de ser selecionado para representar a autocorrelação entre os dados.

Usando o espaço bidimensional, a estrutura espacial de uma variável pode ser visualizada por meio de mapas. Para produzir mapas, precisamos interpolar os valores em locais não amostrados. Em geoestatística, o método de previsão da correlação espacial entre os dados é chamado Krigagem (DUFFERA et al. de 2007).

Krigagem é um método de interpolação em homenagem ao engenheiro de minas Sul-Africano DG Krige, que desenvolveu a técnica em uma tentativa de prever com mais precisão as reservas de mineração de ouro na década de 1960. Ao longo das últimas décadas, a Krigagem tornou-se uma ferramenta fundamental no campo da geoestatística. A Krigagem baseia-se no pressuposto de que o parâmetro a ser interpolado pode ser considerado como uma variável localizada: a teoria das variáveis regionalizadas (MATHERON, 1963).

A Interpolação Krigagem, através do semivariograma, fornece uma estimativa interpolação ideal de valores observados e suas relações espaciais, usando pontos próximos ponderados pela distância do local de interpolação e do grau de autocorrelação ou estrutura espacial para essas distâncias e calcula pesos ideais para cada distância de amostragem (WACKERNAGEL, 1995). A krigagem ordinária é uma técnica de estimativa conhecida como o melhor e imparcial estimador linear, que tem a grande vantagem de utilizar as informações do semivariograma (CRESSIE, 1993).

Outras técnicas de interpolação (por exemplo Inverso da Distância Ponderada (IDW) e triangulação com interpolação linear) são mais rápidas, mas elas não levam em consideração a correlação espacial dos dados e, assim, simplificam demais a realidade (MABIT; BERNARD 2007).

Em oposição a estes métodos de interpolação de dados determinísticos, a Krigagem se baseia na correlação espacial entre as variáveis quando testadas empiricamente e modeladas a partir dos dados da amostra, mas também visa minimizar a variância do erro, além de fornecer uma indicação da incerteza da estimativa (YOST et al., 1982). Aplicações recentes da geoestatística voltaram a enfatizar a aplicação de mapeamento de Krigagem. Estudos de casos em ciência do solo mostram que a Krigagem é agora usada para construir modelos de incerteza e de

probabilidades condicionais que dependem da configuração de dados (BURGOS et al., 2006; EMERY, 2006).

#### **2.4. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**

A caracterização da variabilidade espacial das propriedades do solo é essencial para a compreensão dos efeitos do manejo da terra em função do solo e serviços dos ecossistemas associados, incluindo os que envolvem a qualidade da água, o sequestro de carbono (C), e a biodiversidade (CAMBARDELLA et al., 1994; GOOVAERTS, 1999; STUTTER et al., 2009).

Esta compreensão da heterogeneidade do recurso do solo é necessária para um projeto eficaz de amostragem experimental (OLIVER; WEBSTER, 1991). No entanto, ainda muito poucos estudos descrevem a variabilidade espacial de várias propriedades do solo e suas inter-relações em uma escala de paisagem, (RIVERO et al., 2007). Aqui argumenta-se que a compreensão da variabilidade das propriedades do solo em uma escala de paisagem vai informar a priorização de áreas para manejo (BRULAND et al., 2006) e, portanto, como tal, é uma ferramenta útil para auxiliar no uso do solo e no gerenciamento do processo de tomada de decisões.

Como o solo é um continuum, suas propriedades espaciais têm de ser autocorrelacionados em uma determinada escala (OLIVER; WEBSTER, 1991) portanto, qualquer análise quantitativa das propriedades do solo tem de levar em conta as coordenadas espaciais das observações (GOOVAERTS, 1999). A Geoestatística permite a quantificação do grau de autocorrelação espacial entre as propriedades ambientais e posterior utilização para a previsão de valores em locais não medidos (OLIVER; WEBSTER, 1991), permitindo a quantificação das escalas de variabilidade espacial facilitando uma melhor compreensão dos mecanismos e dos processos que controlam os padrões espaciais (GOOVAERTS, 1999).

Zonas de manejo são subdivisões dos campos nos quais o manejo uniforme é apropriado (DOERGE de 1999). STAFFORD et al. (1996) relataram que as zonas de manejo podem ser definidas através de um levantamento de solos, ou seja, por tipos de solo. No entanto, as propriedades físicas do solo podem variar consideravelmente entre os locais de amostragem, não só dentro de uma unidade de mapeamento de solo, mas também dentro de uma pequena área de terra aparentemente uniforme (TSEGAYE; HILL, 1998). A heterogeneidade espacial de

propriedades do solo é causada por uma série de fatores e processos que atuam em diferentes escalas espaciais e temporais. Consequentemente, pode existir uma outra abordagem para a definição de zonas de manejo, através de análise direta da distribuição espacial das propriedades físicas do solo (BORUVKA et al., 2005)

O manejo de sites específicos ou a agricultura de precisão procura identificar, analisar e gerenciar a variabilidade espacial e temporal dentro de campos, a fim de otimizar a rentabilidade, sustentabilidade e proteção do meio ambiente (ROBERT et al., 1996). A variabilidade das propriedades do solo pode apresentar desafios de manejo aos produtores, pesquisas em ciência do solo têm sido realizadas para caracterizar esta variação (TRANGMAR et al., 1985).

Tentativas têm sido feitas para analisar a variabilidade das propriedades físicas do solo no interior de um dado campo utilizando o coeficiente de variação (CV). WARRICK e NIELSEN (1980) relataram que o conteúdo de água, a densidade global e saturada tinham baixos CV de 7 a 11%, o tamanho de partícula e retenção de água teve CV médios de 12 para 62%, e da condutividade hidráulica saturada tinha grandes CV de 86-420%. Enquanto o CV fornece uma estimativa relativa da variabilidade de uma propriedade, ele não fornece informações sobre como a variabilidade é distribuída no espaço. Ferramentas de geoestatística, como análise de semivariograma, permitem a diferenciação entre a variação espacialmente estruturada e não estruturada. Eles têm sido usados para estimar propriedades físicas do solo espacialmente variáveis (CAMBARDELLA et al., 1994; TSEGAYE; HILL, 1998; CASSEL et al., 2000), e como guia de mapa propriedades de solos no desenvolvimento de zonas de manejo específico do local.

O uso intensivo da terra tem efeitos comprovados, a longo prazo, sobre as propriedades do solo, incluindo a densidade do solo (FRATERRIGO et al., 2005). No entanto, o manejo do solo tem também efeitos sutis a longo prazo sobre a heterogeneidade espacial dos recursos do solo que pode não ser aparente quando os valores médios são comparados entre os locais e tipos de solo (FRATERRIGO et al., 2005). Apesar do uso do solo agrícola reduzir a variabilidade espacial das propriedades do solo através do cultivo, adubação e pastagem (GILLIAM; DICK, 2010; LI, 2010; PAZ-GONZÁLEZ et al., 2000), as variações naturais na distribuição espacial das propriedades físicas são menos compreendidas (STUTTER et al., 2009). São necessárias urgentemente mais pesquisas para quantificar alterações na variabilidade espacial do solo resultante de alterações no uso da terra (LI, 2010),

A principal aplicação da Geoestatística para ciência do solo tem sido a estimativa e o mapeamento de atributos do solo em áreas não amostradas, Krigagem é um nome genérico adotado pelos geoestatísticos (GOOVAERTS, 1999). As grandes escalas de variação espacial estão relacionadas a mudanças no uso do solo, tipo de solo ou litologia, informação categórica secundária, como o uso da terra, mapas de solo ou geológicos, que podem ser usados para estratificar a área de estudo (VAN MEIRVENNE et al, 1994).

O crescente interesse de cientistas do solo em Geoestatística surge porque eles percebem que a previsão espacial quantitativa deve incorporar a correlação espacial entre as observações (GOOVAERTS, 1999). O conhecimento sobre a relação espacial entre o desempenho das culturas e os indicadores físicos da qualidade do solo, tem o potencial de diminuir o fosso entre os rendimentos alcançados e o rendimento potencial das culturas. Assim, representa uma enorme oportunidade para o aumento da eficiência da produção de grãos no Tropicó Úmido. O desafio é preencher este fosso e atender as metas de IEA.

### **Referências Bibliográficas**

ALEXANDROU, A.; EARL, R. The Relationship among the Pre-compaction Stress, Volumetric Water Content and Initial Dry Bulk Density of Soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 71, n. 1, p. 75-80, 1998.

AMIRINEJAD, A. A.; KAMBLE, K.; AGGARWAL, P.; CHAKRABORTY, D.; PRADHAN, S.; MITTAL, R. B. Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. **Geoderma**, v. 160, n. 3–4, p. 292-303, 2011.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, 2004/11 2004.

BALMFORD, A.; GREEN, R. E.; SCHARLEMANN, J. P. W. Sparring land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. **Global Change Biology**, v. 11, n. 10, p. 1594-1605, 2005.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Chapter 11 - Mechanisms of Crop Responses to Soil Compaction. In: SOANE, B. D. e OUWERKERK, C. V. (Ed.). **Developments in Agricultural Engineering**: Elsevier, v. Volume 11, 1994. p.237-264.

BORUVKA, L.; MLADKOVA, L.; DRABEK, O. Factors controlling spatial distribution of soil acidification and Al forms in forest soils. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 99, n. 9, p. 1796-1806, 2005. ISSN 0162-0134.

BOUMA, J. Land quality indicators of sustainable land management across scales. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 88, n. 2, p. 129-136, 2002.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1986. p.463-478.

BRULAND, G. L.; GRUNWALD, S.; OSBORNE, T. Z.; REDDY, K. R.; NEWMAN, S. Spatial Distribution of Soil Properties in Water Conservation Area 3 of the Everglades. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1662-1676, 2006/9 2006.

BURGOS, P.; MADEJÓN, E.; PÉREZ-DE-MORA, A.; CABRERA, F. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. **Geoderma**, v. 130, n. 1–2, p. 157-175, 2006.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, June 15, 2010 2010.

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

CARBERRY, P. S.; BRUCE, S. E.; WALCOTT, J. J.; KEATING, B. A. Innovation and productivity in dryland agriculture: a return-risk analysis for Australia. **The Journal of Agricultural Science**, v. 149, n. SupplementS1, p. 77-89, 2011.

- CASSMAN, K. G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 96, n. 11, p. 5952-5959, May 25, 1999 1999.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3–4, p. 227-239, 2004.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C., et al (Ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994. p.1-21.
- DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, v. 137, n. 3–4, p. 327-339, 2007.
- EMERY, X. Ordinary multigaussian kriging for mapping conditional probabilities of soil properties. **Geoderma**, v. 132, n. 1–2, p. 75-88, 2006.
- GARDI, C.; TOMASELLI, M.; PARISI, V.; PETRAGLIA, A.; SANTINI, C. Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands. **European Journal of Soil Biology**, v. 38, n. 1, p. 103-110, 2002.
- GILLIAM, F. S.; DICK, D. A. Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use. **Plant Ecology**, v. 209, n. 1, p. 83-94, 2010.
- GOLDEN SOFTWARE. Surfer Version 7 – **Surface Mapping System**. Golden, Golden Software, 2004.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. **Geoderma**, v. 103, n. 1–2, p. 3-26, 2001.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 1-45, 1999.
- GOVAERTS, B.; SAYRE, K. D.; DECKERS, J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 163-174, 2006.
- HERRICK, J. E. Soil quality: an indicator of sustainable land management? **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2000.
- HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P. S.; ROBERTSON, M. J.; GAYDON, D. S.; BELL, L. W.; MCINTOSH, P. C. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. **European Journal of Agronomy**, v. 44, n. 0, p. 109-123, 2013.



IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; BESCANSA, P.; ENRIQUE, A.; FERNANDEZ-UGALDE, O.; KARLEN, D. L. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. **Soil and Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 17-25, 2010.

JONES, C. A. Effect of Soil Texture on Critical Bulk Densities for Root Growth1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 6, p. 1208-1211, 1983 1983.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3-4, p. 145-156, 2003.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation: (A guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; BINDRABAN, P. S.; ASSENG, S.; MEINKE, H.; DIXON, J. Eco-efficient Agriculture: Concepts, Challenges, and Opportunities All rights reserved. **Crop Science**, v. 50, n. Supplement\_1, p. S-109-S-119, 2010/3 2010.

KILİÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBAŞ, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 1-11, 2004.

LI, L.; CHAN, K. Y.; NIU, Y.; LI, G.; OATES, A.; DEXTER, A.; HUANG, G. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil and Tillage Research**, v. 113, n. 2, p. 82-88, 2011.

LI, Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? **Geoderma**, v. 159, n. 1-2, p. 63-75, 2010

MABIT, L.; BERNARD, C. Assessment of spatial distribution of fallout radionuclides through geostatistics concept. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 97, n. 2-3, p. 206-219, 2007.

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

McKYES, 1985. **Soil Cutting and Tillage**. Elsevier, Amsterdam.

MOHANTY, M.; PAINULI, D. K.; MISRA, A. K.; GHOSH, P. K. Soil quality effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1-2, p. 243-250, 2007.

MZUKU, M.; KHOSLA, R.; REICH, R.; INMAN, D.; SMITH, F.; MACDONALD, L. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 5, p. 1572-1579, 2005/9 2005.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **CATENA**, v. 113, n. 0, p. 56-69, 2014.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. How geostatistics can help you. **Soil Use & Management**, v. 7, n. 4, p. 206-217, 1991.

ORTEGA, R. A.; SANTIBÁÑEZ, O. A. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 58, n. 1, p. 49-59, 2007.

PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIEIRA, S. R.; TABOADA CASTRO, M. T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p. 273-292, 2000.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 1-2, p. 131-167, 1997.

RIVERO, R. G.; GRUNWALD, S.; BRULAND, G. L. Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. **Geoderma**, v. 140, n. 4, p. 428-443, 2007.

ROLDÁN, A.; CARAVACA, F.; HERNÁNDEZ, M. T.; GARCÍA, AMP; X; A, C.; SÁNCHEZ-BRITO, C.; VELÁSQUEZ, M.; TISCAREÑO, M. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). **Soil and Tillage Research**, v. 72, n. 1, p. 65-73, 2003.

SINGER, M.J., EWING, S., 2000. **Soil quality**. In: Sumner, M.E. (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. G271-G298.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 194-204, 2006.

STAFFORD, J. V.; AMBLER, B.; LARK, R. M.; CATT, J. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 14, n. 2-3, p. 101-119, 1996.

STUTTER, M. I.; LUMSDON, D. G.; BILLET, M. F.; LOW, D.; DEEKS, L. K. Spatial variability in properties affecting organic horizon carbon storage in upland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1724-1732, 2009.

TITTONELL, P.; GILLER, K. E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. **Field Crops Research**, v. 143, n. 0, p. 76-90, 2013.

- TOPP, G. C.; DOW, B.; EDWARDS, M.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E.; COOK, F. J. Oxygen measurements in the root zone facilitated by TDR. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 80, n. 1, p. 33-41, 2000/02/01 2000.
- TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Chapter 2 **Physical attributes of soil quality**. In: GREGORICH, E. G. e CARTER, M. R. (Ed.). **Developments in Soil Science**: Elsevier, v. Volume 25, 1997. p.21-58.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in agronomy**. Vol. 38, p. 45-94, 1985.
- TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, v. 163, n. 2, p. 143-154, 1998.
- VAN OUWERKERK, C.; SOANE, B. D. Chapter 26 - Conclusions and Recommendations for Further Research on Soil Compaction in Crop Production. In: SOANE, B. D. e OUWERKERK, C. V. (Ed.). **Developments in Agricultural Engineering**: Elsevier, v. Volume 11, 1994. p.627-642.
- WACKERNAGEL, H., 1995. **Multivariate Geostatistics**. Springer-Verlag, Berlin.
- WARKENTIN, B. P. The changing concept of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 50, n. 3, p. 226-228, 1995.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. 13 - Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of Soil Physics**: Academic Press, 1980. p.319-344.
- YOST, R. S.; UEHARA, G.; FOX, R. L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas; I, semi-variograms. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 1028-1032, 1982.

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO  
AMARELO DISTROCOESO**

---

**CAPÍTULO II**

# VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO EM UM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO

V.R.A. Macedo, E. G. Moura

**Resumo:** A agricultura de precisão se baseia na ideia de que a variabilidade dos principais fatores responsáveis pela produtividade da cultura podem ser identificadas, quantificadas e espacialmente delimitadas. Por isso, este trabalho teve por objetivo avaliar e mapear a variação espacial dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho e examinar correlação entre a variação espacial desses atributos e o rendimento do milho. Para isso foram delimitados 417 pontos amostrais numa grade uniforme de 5 x 7 m. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos, para a determinação dos atributos físicos e com o penetrômetro digital para determinação da resistência a penetração, na cultura do milho foram avaliados os componentes de produtividade. A krigagem ordinária foi utilizada para interpolar os valores, de modo a definir o padrão espacial das variáveis estudadas por meio dos semivariogramas, o que permitiu a elaboração dos mapas de isolinhas. As variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, ajustando-se o modelo exponencial para a maioria das variáveis. A grade experimental mostrou-se adequada para a avaliação da dependência espacial das variáveis estudadas. A produtividade do milho foi correlacionada com a resistência à penetração na camada de 11 a 20 cm, pressão máxima, porosidade total e teor de areia fina, o que evidenciou a influência destes atributos na produtividade do milho, portanto os atributos selecionados a podem ser utilizados como indicadores físicos no mapeamento de zonas de manejo específico para o cultivo do milho.

**Palavras-chave:** krigagem, qualidade física do solo, semivariograma, zonas de manejo

---

**V.R.A. Macedo** Mestrando em Agroecologia; Universidade Estadual do Maranhão - UEMA; São Luís, Maranhão [viniram@hotmail.com](mailto:viniram@hotmail.com);

**E. G. Moura** Professor Dr. do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, [egmoura@elo.com.br](mailto:egmoura@elo.com.br)

## Introdução

A variabilidade de rendimento das culturas foi relatada mesmo em campos bem manejados (Amado et al. 2007). Esta observação é atribuída a zonas com diferentes tipos de solo, variabilidade da qualidade do solo, ao microclima e os fatores relacionados com o *input* de insumos e as complexas interações entre os atributos (Hörbe et al. 2013; Ortega e Santibáñez 2007).

As propriedades físicas e químicas do solo são um dos fatores que afetam o rendimento da maioria das culturas (Cambardella et al. 1994). Em algum lugar entre o que representa o campo como uma unidade única e a representação do campo como uma resolução contínua de dados, encontra-se o conceito de zonas de manejo (Kitchen et al. 2005).

O manejo de sites específicos, também conhecido como agricultura de precisão, é um sistema de manejo que considera a variabilidade espacial e temporal das propriedades do solo e da produtividade da cultura (Mulla e Schepers 1997). Zonas de manejo de sites específicos são usadas para delinear áreas de um campo para avaliar os efeitos dos atributos do solo sobre o rendimento. O manejo de sites específicos é uma ferramenta que permite alcançar o desempenho ideal das culturas em todo o campo.

Os métodos para delimitar as zonas de gestão variam amplamente nas informações utilizadas, bem como as técnicas para criar os limites da zona (Kitchen et al. 2005). Alguns exemplos incluem polígonos desenhados a mão sobre mapas de produtividade e/ou fotos do solo descoberto (Fleming et al. 2000), classificação dos dados do solo ou mapas digitais de elevação (Franzen et al. 2002) e identificação de estabilidade de produção utilizando variação temporal (Whelan e McBratney 2000).

O interesse na identificação de zonas de produtividade é devido ao fato de que as decisões do manejo são dependentes de estimativas confiáveis do rendimento esperado (Kitchen et al. 2005). As zonas de manejo de sites específicos podem ser utilizadas como ferramenta para diminuir o fosso entre os rendimentos agrícolas médios e o teto de rendimento potencial das culturas, de forma que a agricultura possa atender a demanda crescente de alimentos, objetivo da intensificação ecológica da agricultura.

A intensificação ecológica da Agricultura (IEA) pode ser definida como produzir mais alimento por unidade de utilização de recursos, minimizando o impacto da produção de alimentos no ambiente (Hochman et al. 2013). Cassman (1999) relacionou três pilares para a intensificação ecológica da produção de cereais: potencial de produção, agricultura de precisão e qualidade do solo.

A qualidade do solo é composta por três aspectos principais, o biológico, o físico e o químico, e como os biológicos afetam os processos físicos do solo, tais como o movimento da água e aeração, assim como os processos químicos (Dexter 2004; Topp et al. 1997). Dentre os indicadores de qualidade do solo, a qualidade física do solo pode ser descrita de muitas maneiras diferentes. Pesquisadores como Dexter e Czyż (2000) e Du et al. (2009) comentam que não há um único indicador da qualidade física do solo.

Os indicadores físicos de qualidade do solo, capacidade de retenção água, capacidade de aeração, temperatura e resistência do solo a penetração de raízes, são muito importantes para o crescimento da planta na região equatorial (Jayawardane e Chan 1994). O efeito dos atributos físicos do solo no rendimento das culturas pode ser melhor evidenciado em solos propensos a coesão, que desenvolvem elevada resistência, durante o secamento, cujo os efeitos das limitações físicas podem ser imperceptíveis ou devastadores em relação ao preparo e desenvolvimento das culturas. Mullins et al. (1990) indicaram uma gama de problemas agrônômicos associados aos solos com esse comportamento, incluindo o tempo restrito para o preparo do solo e o incremento dos impedimentos físicos para o adequado desenvolvimento radicular.

A saúde física do solo deve ser quantificada em termos de um índice unificado solo obtido a partir dos valores de classificação individual dos principais parâmetros físicos do solo (Amirinejad et al. 2011). A avaliação dos níveis dos atributos físicos do solo nos campos agrícolas é normalmente realizada tomando observações de solo em uma grade retangular ou em lugares cuja as coordenadas espaciais foram registradas por sistema de posicionamento global e interpolando valores entre pontos de amostragem, fazendo uso de geoestatística (Bai 2001; Baxter et al. 2003). A geoestatística fornece um conjunto de ferramentas para apresentar a estrutura espacial dos atributos do solo, definindo os valores do alcance, patamar, efeito pepita e previsão do valor do parâmetro em locais não amostrados por krigagem e também avaliação da incerteza ligada a estas previsões (Huang e Jin 2002; Jin e Jiang 2002).

Este trabalho parte da hipótese de que os atributos físicos do solo são limitantes a produtividade do milho e que dentro do campo encontram-se diferentes zonas que afetam o desempenho da cultura, o que aumenta o fosso entre a produtividade alcançada e a potencial. Para diminuir o *gap* entre a produtividade atual e a potencial no trópico úmido o primeiro passo deve contemplar o conhecimento sobre a relação espacial entre o desempenho das culturas e os indicadores físicos da qualidade do solo. Por isso, este trabalho teve por objetivo avaliar e mapear a variação espacial dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho e examinar correlação entre a variação espacial desses atributos e o rendimento do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso. O intuito final será o de subsidiar a intensificação ecológica da agricultura por meio do delineamento de sites que merecerão manejos específicos posteriores.

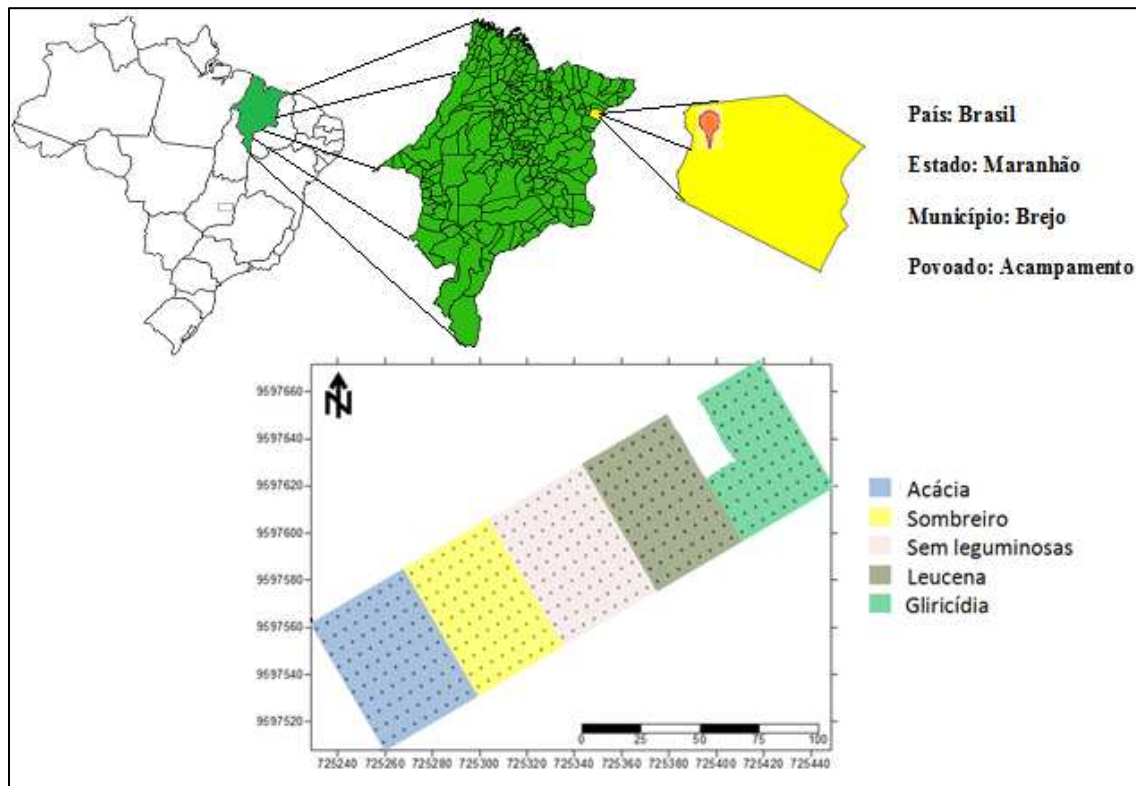
## **Material e métodos**

### Local do experimento

O presente estudo foi realizado em um campo experimental de 1,41 há, localizado no povoado Acampamento município de Brejo – MA, Brasil (3° 38' de latitude sul e 42° 58' de longitude oeste). O solo da área foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso, apresentando topografia plana (inclinação <1%). Para correção da acidez foram aplicadas, em superfície, 2 ton ha<sup>-1</sup> de um corretivo com PRNT igual a 50%. Para correção dos baixos teores de fósforo do solo, foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo durante o plantio das leguminosas no ano de 2011.

Para a instalação do sistema de cultivo em aleias, a área foi dividida em cinco partes iguais de 42,5 por 70 m, quatro delas semeadas com leguminosas arbóreas, sombreiro (*Clitoria fairchildiana*), acácia (*Acacia mangium*), leucena (*Leucaena leucocephala*), e glirícidia (*Glirícidia sepium*) no espaçamento de 2,5 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, outra área com as mesmas dimensões foi mantida sem leguminosas (Figura 1). A fim de medir os parâmetros físicos do solo e de produtividade da cultura do milho, 417 pontos amostrais foram delimitados numa grade uniforme de 5 x 7 m (Figura 1). As coordenadas de cada ponto amostral foram registradas utilizando um aparelho de GPS (Global Position System).





**Figura 1** Mapa da área de estudo

### Atributos físicos do solo

Foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos com capacidade de  $100\text{cm}^3$ , em cada ponto, na profundidade de 02-08 cm. As amostras foram saturadas, levadas à mesa de tensão e equilibradas no potencial de 10 kPa, e solo de cada anel foi seco em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , entre as operações citadas foi coletada a massa do solo em balança de precisão de 0,01g.

A densidade do solo foi calculada pela fórmula  $D_s = m/v$ , onde:  $D_s$  = densidade do solo;  $m$  = massa do solo da amostra seca a  $105^\circ\text{C}$ ;  $v$  = volume do anel. A porosidade total ( $P_t$ ) foi calculada pela fórmula  $P_t = [1 - (D_s/2,65)]$ , onde:  $P_t$  = porosidade total;  $D_s$  = densidade do solo e densidade de partícula foi assumida como  $2,65 (\text{Mg m}^{-3})$ . A percentagem de saturação ( $\%S$ ) foi determinada pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco ( $105^\circ\text{C}$ ) dividido pelo volume do cilindro. A macroporosidade corresponde ao volume de poros maior que  $60\mu$ , foi calculada como a diferença de massa entre a amostra saturada em água e a amostra equilibrada a 10 kPa. Os teores de argila (partículas menores do que 0,002 mm), silte (partículas

entre 0,002 e 0,05 mm), areia fina (partículas entre 0,05 e 0,2 mm) e areia grossa (partículas entre 0,2 e 2 mm) foram determinados após a dispersão com hidróxido de sódio pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

A resistência à penetração e a umidade do solo foram determinadas na camada de 0 a 20 cm, com duas amostragens por ponto, utilizando um penetrômetro digital da marca Falker e um aparelho TDR de marca Trime-Fm, a primeira amostragem foi feita quatro dias após uma chuva, e a segunda dez dias após uma chuva, os dados apresentados representam a média das duas avaliações.

#### Atributos de produtividade da cultura do milho

No início do período chuvoso do ano de 2013 foram semeados entre as fileiras das leguminosas três fileiras de milho (*Zea mays* L.) cultivar AG 7088, no espaçamento de 80 cm e 4 fileiras de capim mulato (*Brachiaria hibrida* cv. *Mulato*) nos espaços das entrelinhas de milho, que foi adubado com 400 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 04-20-20 + 7 kg de Zn ha<sup>-1</sup>. Às adubações de cobertura foram aplicadas, 15 dias após o plantio do milho no estágio de quatro folhas, com aplicações de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia e 36 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio, e 40 dias após a germinação do milho no estágio oito folhas, com aplicação de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia.

Na fase de colheita do milho foram avaliados, a produtividade a partir das plantas coletadas em uma área de 5 m<sup>2</sup> por ponto amostral, número de espigas por planta obtida pela quantidade média de espigas de 15 plantas, e peso de 100 grãos obtido a partir do peso médio de três repetições de 100 grãos e peso das espigas obtido a partir das relações entre o peso de 100 grãos, número de espigas e produção por ponto.

#### Análise Geoestatística

As análises de dados foram feitas em cinco etapas: (I) estatística descritiva, (II) testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), (III) parâmetros do semivariograma, (IV) correlações entre as propriedades do solo e componentes de produtividade da cultura do milho, (V) mapas das variáveis, que foram produzidos pela técnica de krigagem (Isaaks e Srivastava, 1989). O

software GS+ 7.0 (Gamma Software Design) foi usado para a construção de semivariogramas e análise da estrutura espacial para variáveis.

A semivariância é definida como a metade da esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância  $h$  (lag) (Trangmar et al., 1985). A semivariância estimada no lag  $h$  é

Equação 1:

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

em que,  $N(h)$  - o número de pares de valores experimentais medidos em  $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$ , separados pelo vetor  $h$  (espaço lag). Os valores de  $Z$  foram os atributos físicos do solo estudado, enquanto os valores de  $x_i$  e  $x_i + h$  foram definidos de acordo com a localização geográfica das amostras feitas no campo.

Foram testados os modelos de semivariogramas: (a) esférico,  $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3]$  para  $(0 < h < a)$  e  $\gamma^*(h) = C_0 + C_1$  para  $h \geq a$ ; (b) exponencial,  $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h/a)]$  para  $(0 < h < d)$ ; e (c) gaussiano,  $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h^2/a^2)]$  para  $(0 < h < d)$ , em que  $d$  é a distância máxima na qual o semivariograma é definido. O ajuste dos semivariogramas possibilitou definir os valores do efeito pepita ( $C_0$ ), do alcance ( $A$ ) e do patamar ( $C + C_0$ ).

A seleção do modelo ajustado dos semivariogramas foi feita com base na menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), no maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e maior grau de dependência espacial (GDE). Segundo Robertson (2008), a proporção obtida utilizando-se a Equação 2, o GDE pode ser classificado em: dependência espacial fraca em  $GDE \leq 25\%$ , dependência espacial moderada quando  $25\% < GDE \leq 75\%$  e dependência espacial forte em  $GDE > 75\%$ . Equação 2:

$$(2) GDE = \left[ \frac{C}{C + C_0} \right] \times 100$$

A validação cruzada foi feita para analisar a qualidade do modelo matemático ajustado dos semivariogramas para cada uma das propriedades do solo estudado. A interpolação dos valores foi feita pelo método geoestatístico da Krigagem Ordinária, de modo a definir o padrão espacial das variáveis estudadas, o que permitiu a elaboração dos mapas de isolinhas, com o auxílio da Equação 3:

$$(3) Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i)$$

em que:  $Z^*(x_0)$  = variável interpolada;  $\lambda_i$  = peso da  $i$ -ésima localidade vizinha;  $Z(x_i)$  = valor da variável para a  $i$ -ésima localidade; e  $N$  = número de localidades vizinhas empregadas para interpolação do ponto (Paz-González et al. 2000).

#### Metodologia para o cálculo de Índice de Avaliação Física (IAF)

A pontuação dos atributos físicos do solo foi adaptada de Gupta e Abrol (1993) e Amirinejad et al. (2011) para solos de textura fina. *Escores* para diferentes atributos do solo foram dados de acordo com a classificação expressa na Tabela 1, para safra de milho. A classificação abaixo foi preparada através da análise dos dados físicos.

**Tabela 1** Avaliação de diferentes parâmetros físicos do solo para o cultivo de milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso

Parâmetros									
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )		RP5 (0-20cm) (MPa)		% S (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		MAC (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	
Níveis	Clas.*	Níveis	Clas.	Níveis	Clas.	Níveis	Clas.	Níveis	Clas.
<1,27	0,80	>2,0	0,6	>0,44	1,00	> 0,24	1,00	>0,60	0,90
1,27-1,34	0,90	1,5-2,0	0,7	0,44-0,41	0,90	0,20-0,24	0,90	0,56-0,6	1,00
1,35-1,41	1,00	1,0-1,49	0,8	0,40-0,38	0,80	0,15-0,19	0,80	0,51-0,55	0,90
1,42-1,48	0,90	0,5-0,99	0,9	0,38-0,36	0,70	0,10-0,14	0,70	0,46-0,50	0,80
1,49-1,55	0,80	<0,5	1,00	<0,36	0,50	<0,10	0,60	0,40-0,45	0,70
1,56-1,62	0,75								
1,63-1,70	0,70								
>1,7	0,65								

\*Clas. = classificação Ds = densidade do solo; RP5 = resistência a penetração de 0 – 20 cm; % S = percentagem de saturação; MAC = macroporosidade; Pt = porosidade total.

Para um determinado local, a cada um destes parâmetros foi atribuído um valor de classificação correspondente ao seu valor real, consultando a tabela de classificação. A cada um destes parâmetros foi atribuída uma pontuação de 1 se o valor do parâmetro estivesse dentro da faixa ideal. Quanto maior o desvio do valor do parâmetro da faixa ideal, menor a pontuação atribuída a ele. O produto de valores de classificação de todos os parâmetros resultou no índice avaliação física (IAF). O IAF foi um indicador do estado geral de saúde física do solo. Para a faixa de IAF > 0,75, 0,50-0,75, 0,25-0,50 e <0,25, o estado de saúde física do solo e,

consequentemente, o seu potencial de produção poderia ser rotulado como muito bom, bom, médio ou pobre, respectivamente.

## **Resultados e discussão**

A análise exploratória de dados espaciais foi um pré-requisito para a realização da análise geoespacial. Os valores de média e mediana para a maioria das variáveis, de um modo geral, apresentaram certa aproximação, o que pode indicar uma distribuição simétrica, onde as medidas de tendência central são dominadas por valores típicos (Tabela 2). Souza et al. (2004), ao estudar a variabilidade espacial de atributos físicos, identificaram valores aproximados nas medidas de tendência central (média, mediana) para densidade do solo e porosidade total. Segundo Little & Hills (1978), quando os valores da média e mediana são semelhantes, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal.

Observa-se que no tocante aos atributos físicos e componentes de produtividade, a linha de tendência apresentou um leve deslocamento indicando um afastamento da normalidade dos dados, a maioria das variáveis podem ser apresentadas como uma distribuição não normal, excetuando-se os teores de areia fina e grossa, resistência à penetração nas profundidades 6-10 cm e 16-20 cm, umidade do solo no momento da amostragem e produtividade do milho que apresentaram distribuição normal.

Resultados contrastantes foram observados por Nielsen et al. (1973), mostrando um leve deslocamento da linha de tendência, porém dentro da normalidade para alguns atributos físicos do solo. Embora tenha ocorrido distribuição não normal para a maioria das variáveis, isso não foi um problema para utilização da krigagem ordinária. Estes resultados reforçam relatos anteriores que em geoestatística os dados não precisam ter distribuição normal (Amirinejad et al. 2011; Mulla & Mcbratney, 2002; Webster 1985). Essa ocorrência de dados não normais de algumas variáveis, pode ser atribuída a heterogeneidade intrínseca do solo, por exemplo material de origem e intemperização, erros na amostragem ou a heterogeneidade da área de estudo, devido ao impacto causado pelo manejo anterior à instalação do experimento por meio da ação de fatores externos que promovem a alteração do solo. As práticas de manejo inadequadas tendem a manter o solo não homogêneo, fatores extrínsecos (Cambardella et al. 1994).

Os coeficientes de variação (CV) das variáveis estudadas (Tabela 2) são classificados segundo Warrick e Nielsen (1980), onde o CV <12 são de baixa variabilidade, entre 12 e 60% de média variabilidade e > 60% de alta variabilidade dos dados. Seguindo esse pressuposto, as variáveis densidade do solo, porosidade total, percentagem de saturação, areia fina e areia grossa apresentaram CV na faixa de baixa variabilidade enquanto as variáveis, índice de avaliação física, macroporosidade, silte, argila, resistência à penetração em todas as profundidades, umidade no momento da amostragem e os componentes de produtividade apresentaram CV na faixa de média variabilidade. Duffera et al. (2007) encontraram coeficientes de variação para a maior parte das propriedades físicas do solo superior a 20%, indicando de média a grande variabilidade espacial. Por ser adimensional o coeficiente de variação tem a habilidade de comparar as diferenças entre as variáveis estudadas, ressaltando que os valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados.

**Tabela 2** Parâmetros da estatística descritiva dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso

Atributos	Min	Max	media	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Curtose	k-S
$\rho_s$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,17	1,56	1,398	1,4	0,004508	0,06714	4,8	0,257	0,076
$\emptyset$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,41	0,67	0,473	0,47	0,000746	0,0273	5,8	6,145	0,109
% de saturação (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,33	0,53	0,417	0,42	0,00124	0,0353	8,5	-0,564	0,086
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,13	0,32	0,213	0,21	0,000803	0,0283	13,3	0,607	0,088
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	414,5	624	531,8	532,5	1041,9	32,278	6,1	0,634	0,052*
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	137,5	318,5	206,21	207	600,77	24,511	11,9	1,706	0,052*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	36,5	237	89,41	77	1373,69	37,06332	41,5	2,925	0,195
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	90	300	172,6	180	1479	38,46	22,3	-0,196	0,114
IAF	0.24	0.69	0.451	0.47	0.00832	0.0912	20,2	-0.666	0.109
Resistencia a penetração (Mpa)									
RP 0-5 cm	0,03	1,45	0,393	0,34	0,04971	0,223	56,7	3,476	0,125
RP 6-10 cm	0,19	3,23	1,012	0,95	0,2061	0,454	44,9	1,707	0,059*
RP 11-15 cm	0,27	3,72	1,288	1,24	0,2046	0,4523	35,1	2,521	0,088
RP 16-20 cm	0,56	2,98	1,497	1,45	0,1472	0,3837	25,6	0,801	0,055*
RP 0-20 cm	0,44	2,16	0,958	0,93	0,08301	0,2881	30,1	1,296	0,074
Pressão Máxima (MPa)	0,64	4,33	1,731	1,63	0,2569	0,5069	29,3	3,524	0,089
Prof. da Pressão Máx. (cm)	7	20	17,200	18	8,23	2,87	16,7	0,387	0,2
Umidade	7,4	59,25	18,0704	18,1	9,8433	3,1374	17,3	70,607	0,09
Componentes milho									
Produtividade . (Mg ha <sup>-1</sup> )	1,44	7,56	4,189	4,2	1,179	1,086	25,9	0,165	0,05*
n° de espigas/plantas	0,7	1,9	1,140	1,1	0,0248	0,158	13,9	2,693	0,249
peso de 100 grãos (g)	2,1	33	25,660	26,3	10,55	3,248	12,7	7,37	0,12
grãos/espiga	235	808	472,300	480	4119	64,18	13,6	3,194	0,074

\*Distribuição normal ao nível de significância de 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.  $\rho_s$  = densidade do solo;  $\emptyset$  = porosidade total; IAF = índice de avaliação física; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Ao examinar os semivariogramas experimentais, as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial e a natureza da variação dos dados foi do tipo isotrópica (Tabela 3). O modelo que se ajustou para a maioria das variáveis foi o exponencial, excetuando-se as variáveis resistência à penetração na profundidade de 0-5 cm e produtividade do milho, no qual o modelo esférico foi o mais adequado. Geralmente os modelos isotrópicos exponencial e esférico são os que melhor se adequam aos atributos físicos do solo (Iqbal et al. 2005; Kılıç et al. 2004).

O Efeito pepita para as variáveis estudadas apresentou valores baixos de modo geral, exceto o teor de areia fina, grãos por espiga e peso de 100 grãos que apresentaram valores para o efeito pepita de 601; 10 e 5,42 respectivamente (Tabela 3). Os maiores alcances para os atributos físicos do solo foram encontrados para percentagem de saturação e teor de areia fina, que foram de 458,1 m, 180,3 m respectivamente; tal observação indica que o número de amostras para variável poderia ter sido menor. Os menores alcances foram para umidade no momento da amostragem, profundidade da pressão máxima e resistência à penetração na camada de 0-5 cm, com valores de 4,5 m, 6,9 m e 6,9 m respectivamente (Tabela 3). Assim, a grade amostral utilizada neste estudo (5 x 7 m) foi adequada para caracterizar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e produtividade do milho.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dos modelos ajustados para produtividade, percentagem de saturação, teor de areia fina e peso de 100 grãos apresentaram valores superiores 0,98, 0,97, 0,96, 0,96 e 0,94 respectivamente. O  $R^2$  dos modelos ajustados para umidade no momento da amostragem, índice de avaliação física, resistência à penetração nas profundidades 0-5 cm e 0-20 cm, apresentaram os menores valores, 0,09, 0,27, 0,31 e 0,31 respectivamente. Já as demais variáveis estudadas apresentaram valores de  $R^2$  variando entre 0,40 a 0,86.

Foi encontrado um grau de dependência espacial forte ( $GDE > 75\%$ ) para o, índice de avaliação física do solo, densidade do solo, porosidade total, teor de areia grossa, teor de silte, teor de argila, resistência à penetração em todas as profundidades estudadas, umidade no momento da amostragem resistência máxima, profundidade da pressão máxima e dos componentes de produtividade do milho, número de espigas por plantas e grãos por espiga. O grau de dependência espacial foi moderado ( $25\% < GDE < 75\%$ ) para a percentagem de saturação, teor de areia fina e dos componentes de produtividade do milho produtividade e peso de 100 grãos, e fraco ( $GDE < 25\%$ ) para a macroporosidade. Como observado por Iqbal et al. (2005) em que os semivariogramas resultantes indicaram a existência de moderada a forte dependência



espacial para todas as propriedades físicas do solo, portanto quando as propriedades do solo mostram forte dependência espacial, isso pode indicar que a variabilidade nessas propriedades é controlada pela variação intrínseca das características do solo (Cambardella et al. 1994).

**Tabela 3** Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais dos atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho em um Latossolo Amarelo Distrocóeso

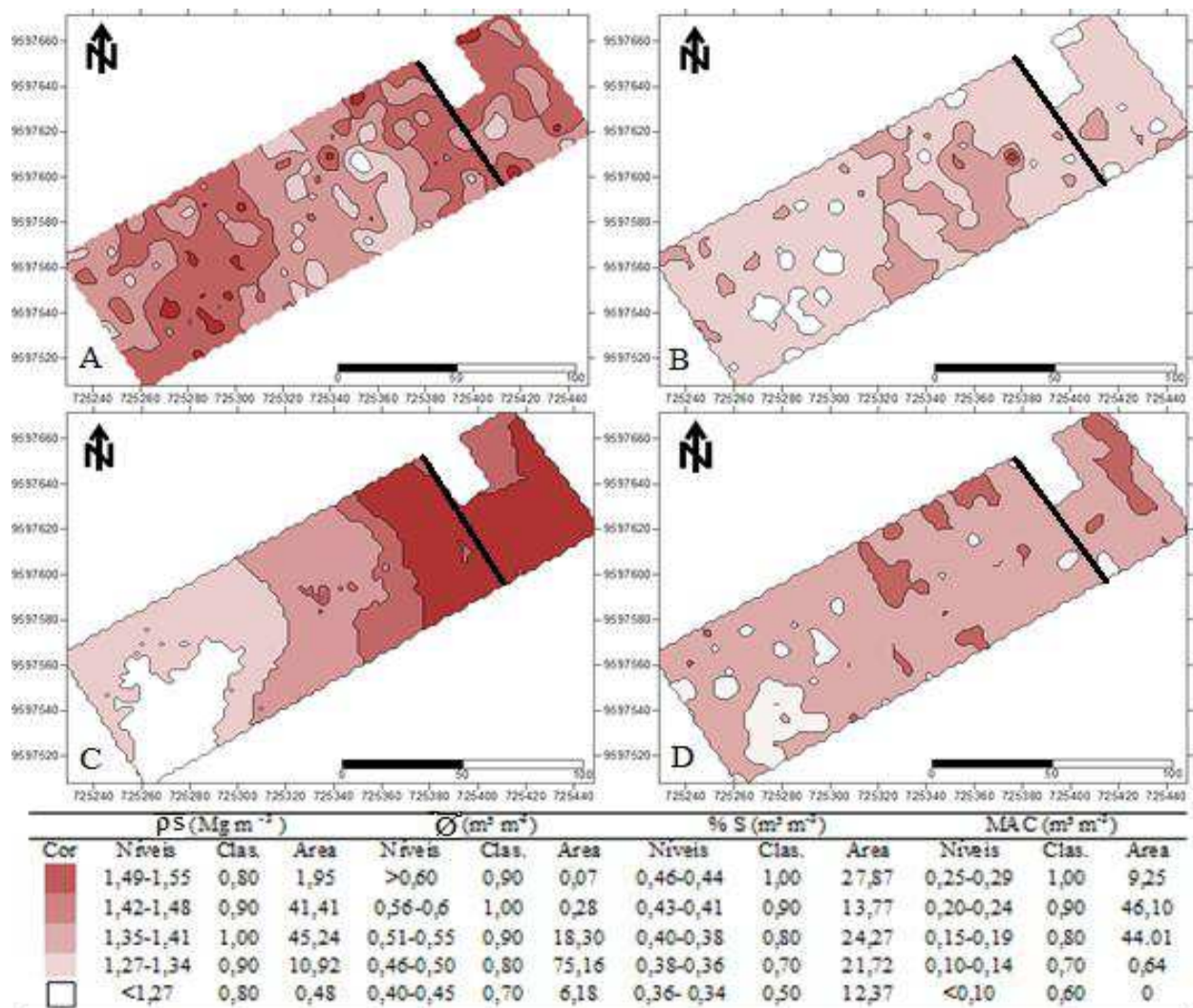
Atributos	MOD	C <sub>0</sub>	C + C <sub>0</sub>	Alcance (m)	R <sup>2</sup>	VC	GDE %	Classe
ρ <sub>s</sub> (Mg m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,000290	0,004260	15,3	0,59	0,68	93	Forte
Ø (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,000045	0,00072	13,5	0,76	0,62	94	Forte
% de saturação (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,000429	0,001338	458,1	0,96	0,97	68	Moderada
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,000014	0,000701	11,4	0,47	0,98	06	Fraca
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	Exponencial	601	1202	180,3	0,96	1,00	50	Moderada
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	Exponencial	1,0	516,7	9,3	0,40	1,00	83	Forte
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Exponencial	1,0	1148	8,7	0,53	1,00	77	Forte
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Exponencial	22	1362	8,4	0,65	0,68	98	Forte
IAF	Exponencial	0,0001	0,00474	13,8	0,27	0,86	99	Forte
<b>Resistencia a penetração (Mpa)</b>								
RP 0-5 cm	Esférico	0,0001	0,0438	6,9	0,86	0,60	99	Forte
RP 6-10 cm	Exponencial	0,0001	0,1592	7,5	0,31	0,86	99	Forte
RP 11-15 cm	Exponencial	0,0001	0,1422	10,5	0,46	0,89	99	Forte
RP 16-20 cm	Exponencial	0,0001	0,0942	13,8	0,44	0,86	99	Forte
RP 0-20 cm	Exponencial	0,0001	0,0526	9,90	0,31	0,92	99	Forte
Pressão Máxima (MPa)	Exponencial	0,0001	0,1717	15,9	0,54	0,88	99	Forte
Prof. da Pressão Máx. (cm)	Exponencial	0,28	7,758	6,9	0,62	0,52	96	Forte
Umidade	Exponencial	0,85	9,74	4,5	0,09	0,81	91	Forte
<b>Componentes milho</b>								
Produtividade (Mg ha <sup>-1</sup> )	Esférico	0,578	1,725	142,3	0,98	0,98	67	Moderada
n° de espigas/plantas	Exponencial	0,000187	0,02424	15,3	0,59	0,63	92	Forte
peso de 100 grãos (g)	Exponencial	5,42	12,544	226,8	0,94	1,00	57	Moderada
grãos/espiga	Exponencial	10,0	3697,0	9,3	0,4	0,79	99	Forte

ρ<sub>s</sub> = densidade do solo; Ø = porosidade total; IAF = índice de avaliação física; MOD = modelo do semivariograma; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C + C<sub>0</sub> = patamar; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; VC = coeficiente de determinação da validação cruzada; GDE = grau de dependência espacial.

Os mapas de classificação dos atributos do solo e componentes de produtividade do milho foram preparados como uma série de contornos coloridos. A densidade do solo (Figura 2-A) foi menor na região central do campo experimental e maior nas duas extremidades. O nível de densidade do solo que representou maior área de abrangência foi o de 1,35 a 1,41 com 45%, nível classificado como ótimo, seguido do nível de 1,42 a 1,48 com 41,41%.

O nível de porosidade total (Figura 2-B) com maior abrangência foi o de 0,46 – 0,50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> com 75,16% da área, ocorrendo principalmente nas duas extremidades do campo experimental. Os maiores valores de % S (Figura 2-C) foram encontrados na porção nordeste do campo, a porção noroeste apresentou os menores valores, os níveis com maior abrangência foram os de 0,46 – 0,44 e 0,43 – 0,41 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> com 27,87 e 13,77% da área respectivamente.

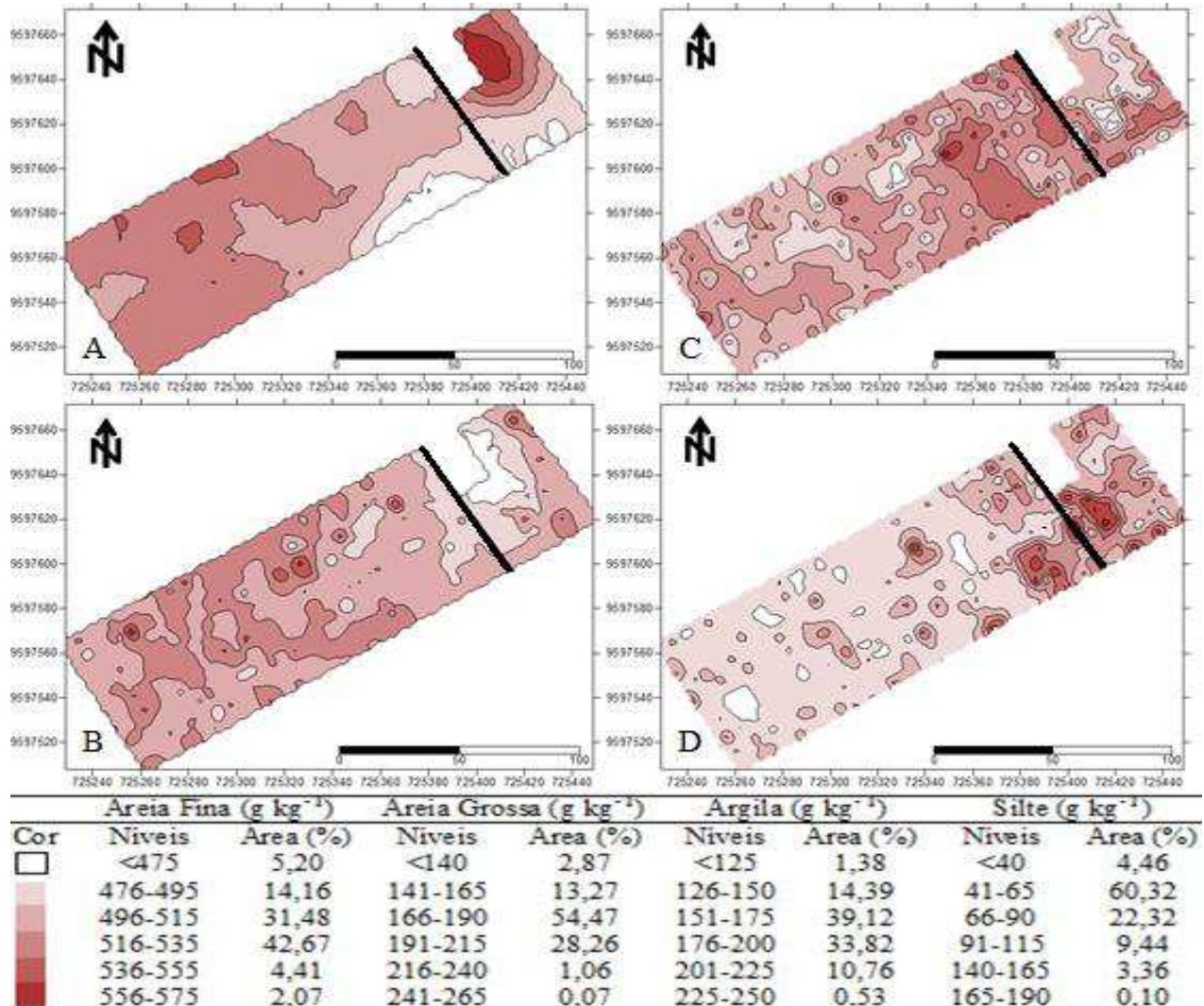
Os níveis de 0,20-0,24 e 0,15- 0,19 foram os que apresentaram maior área de abrangência com 46,1 e 44,01% respectivamente para macroporos (Figura 2-D). A área de estudo não apresentou zonas com volumes de macroporos limitantes. Resultados semelhantes foram encontrados por Moura et al. (2012) no Tropicó Úmido, com valores não limitantes de capacidade de aeração, variando de 0,10 a 0,14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. O limite da macroporosidade em 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> foi estabelecido por (Thomasson 1978) para o crescimento satisfatório das plantas. Resultados encontrados por (Amirinejad et al, 2010) em solos de textura fina mostraram que mais de 95% da camada superficial tinha volume de macroporos menores que 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e que esses resultados foram encontrados em função da compactação (aumento da densidade do solo).



**Figura 2** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da densidade do solo (A), porosidade total (B), percentagem de saturação (C) e macroporosidade (D) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso

A distribuição espacial dos teores de areia fina, areia grossa, argila e silte foram ilustrados na figura 3. O teor de areia fina apresentou maior área de abrangência nos níveis de 516-535 e 496-515 g kg<sup>-1</sup> com 42,67 e 31,48% respectivamente, já o teor de areia grossa apresentou maior área de abrangência nos níveis de 166-190 e 191-215 g kg<sup>-1</sup> com 54,47% e 28,26% respectivamente, os menores teores de areia grossa foram encontrados na porção nordeste do campo experimental. O teor de argila apresentou maior área de abrangência nos níveis 151-175 e 176-200 com 39,12 e 33,82% da área respectivamente, enquanto o teor de silte apresentou maior área de abrangência nos níveis 41 - 65 e 66 - 90 com 60,32 e 22,32% da área

respectivamente, os menores teores de silte foram encontrados na porção nordeste do campo experimental.

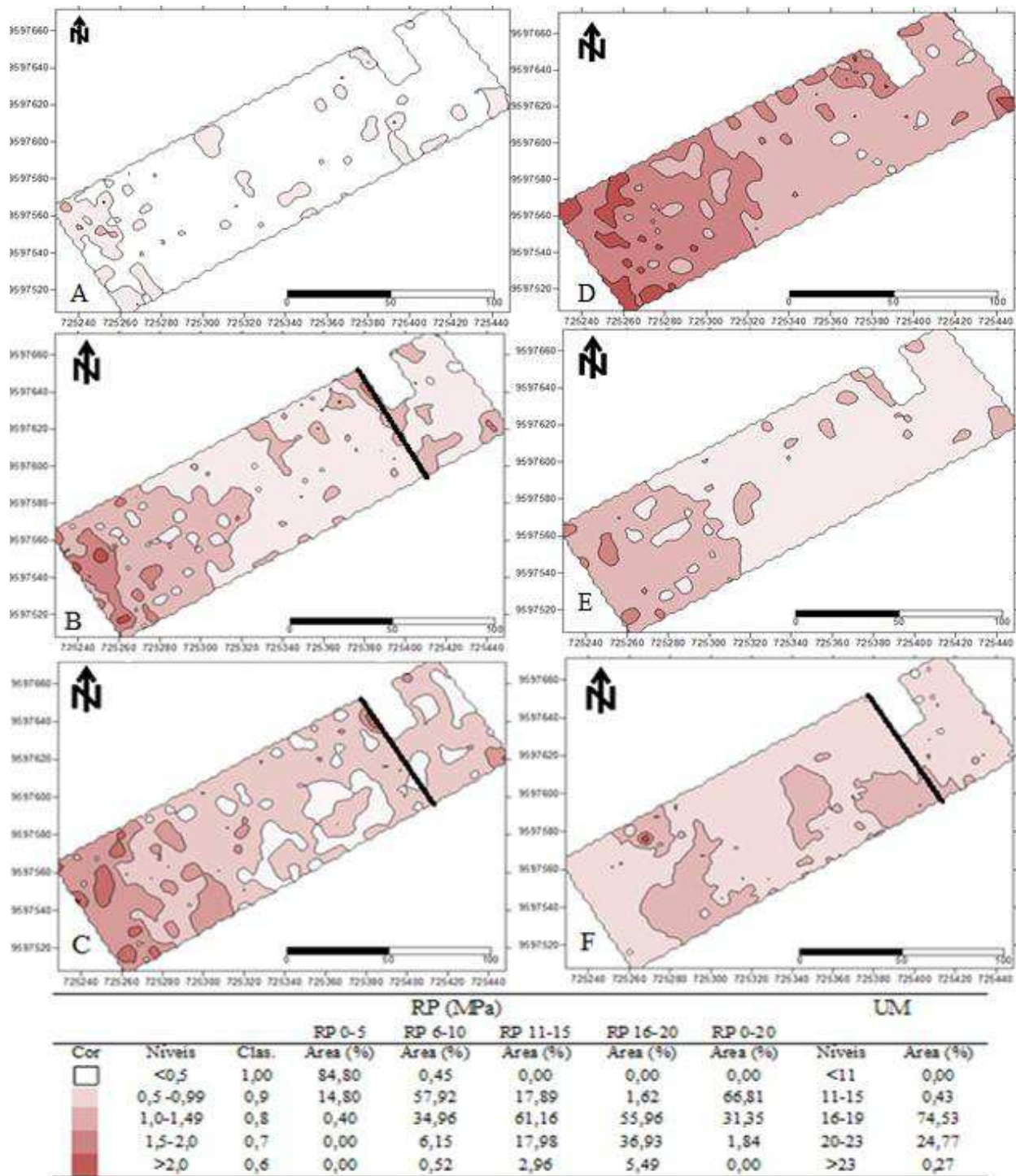


**Figura 3** Mapas de isolinhas da distribuição espacial dos teores de areia fina (A), areia grossa (B), argila (C) e silte (D) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso

Os resultados apresentados para resistência à penetração (Figura 4) na profundidade de 0 – 5 cm demonstram os valores baixos, o nível com maior abrangência foi o de resistência < 0,5 MPa, com aproximadamente 85% da área. Na profundidade de 6 – 10 cm ocorreu aumento da resistência à penetração, o nível com maior abrangência foi o de 0,5 – 0,99 MPa que ocorreu em 57,92% da área, seguido pelo nível 1,0 – 1,49 MPa que ocorreu em 34,96% da área. Na profundidade de 11 – 16 cm o nível de 1,0-1,49 MPa foi o que apresentou a maior abrangência

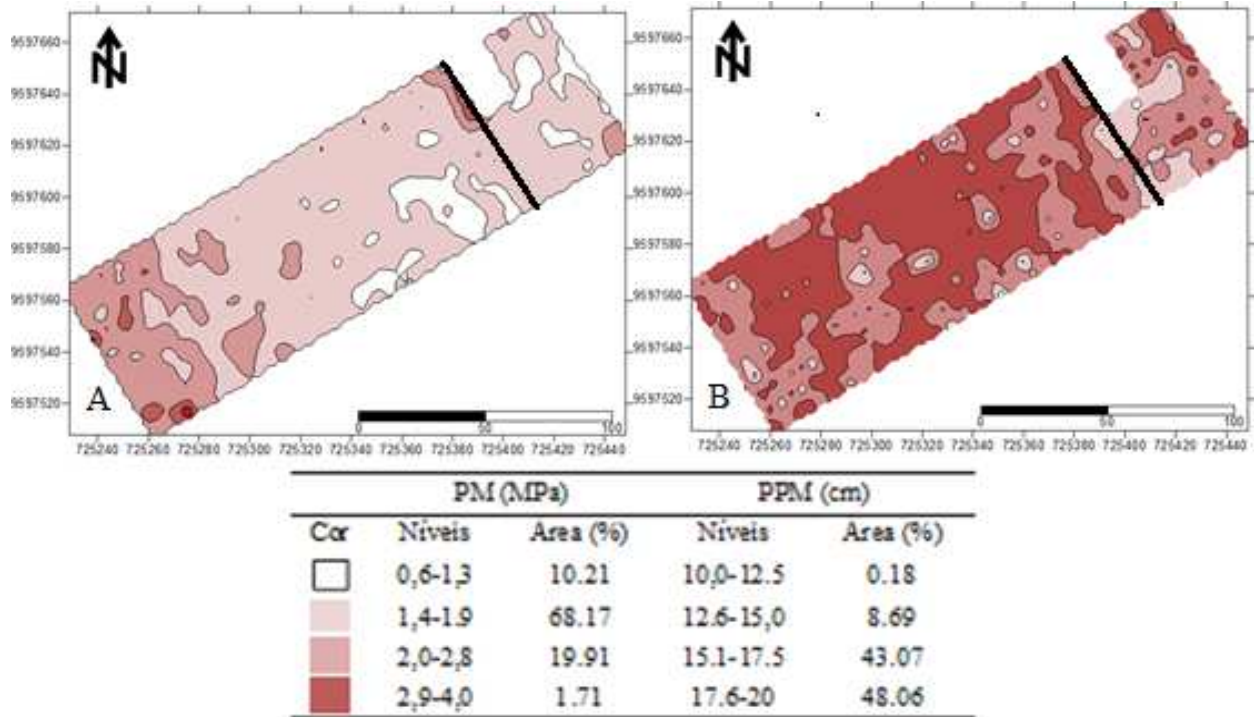
com 61,16% da área; nessa profundidade, apenas 2,96% da área na extremidade noroeste do campo experimental excedeu o limite de 2MPa.

Na profundidade de 16 – 20 cm os níveis de 1,0-1,49 e 1,5-2,0 MPa foram os que apresentaram a maior abrangência com 55,96 e 36,93 % da área; nessa profundidade, apenas 5,49% da área na extremidade noroeste do campo experimental excedeu o limite de 2MPa. A média geral da resistência à penetração na profundidade 0 – 20 cm o nível de 0,5 -0,99 MPa foi o que apresentou maior abrangência de área com 66,81%. A umidade no momento da amostragem apresentou os níveis 16-19 e 20-23% com 74,53 e 24,77 % da área respectivamente, ressaltando que o limite de 2 MPa foi superado nas profundidades de 11 – 15 e 16 – 20 cm, em pequenas áreas. Taylor et al. (1966) e NeSmith et al. (1987) consideram que valores de resistência do solo à penetração acima de 2,0 MPa são restritivos ao crescimento e ao funcionamento do sistema radicular.



**Figura 4** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da resistência a penetração nas profundidades 0 – 5 cm (A), 6 – 10 cm (B), 11 – 15 cm (C), 16 – 20 cm (D), 0 – 20 cm (E) e umidade no momento da amostragem (F) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso

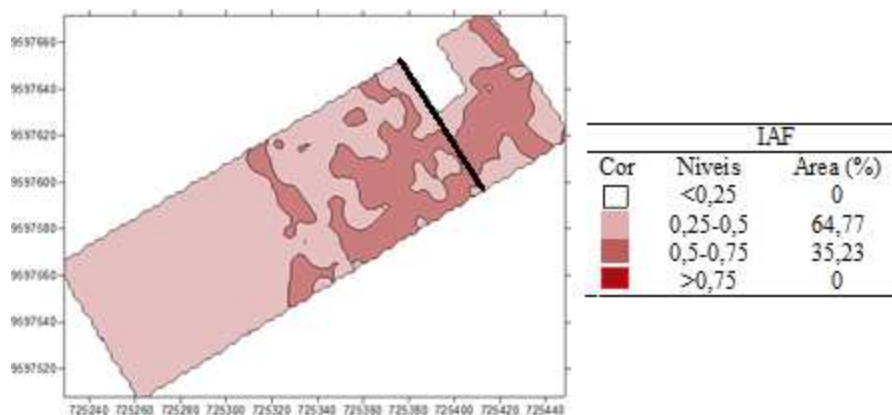
Os valores de pressão máxima (Figura 5) com maior abrangência de área foi encontrado no nível de 1,4-1.9 MPa com 68,17% da área, os maiores valores de pressão foram encontrados na porção noroeste do campo experimental com valores superando o limite de 2 MPa em 21,72% da área em algum momento das avaliações. A pressão máxima foi encontrada principalmente na profundidade de 15 – 20 cm com 91,13% da área.



**Figura 5** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da pressão máxima (A) e profundidade da pressão máxima (B) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso

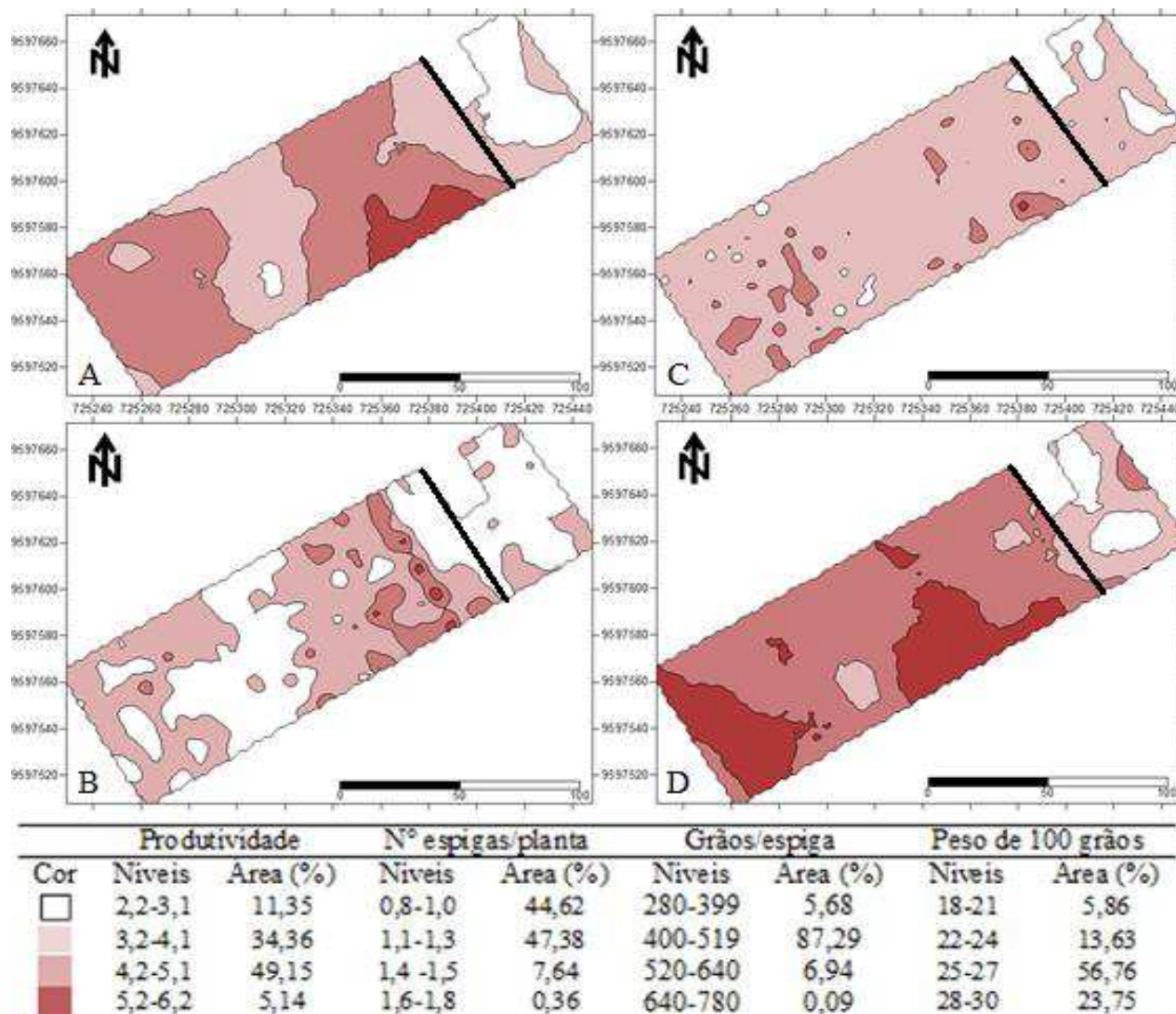
A distribuição espacial do índice de avaliação física foi ilustrada na figura 6, com base no índice de avaliação física 64,77% do campo experimental foi classificado como médio e 35,23% como bom, para o potencial de produção. A porção sudoeste do campo experimental apresentou os melhores resultados do índice de avaliação física.





**Figura 6** Mapas de isolinhas da distribuição espacial do índice de avaliação física de um Latossolo Amarelo Distrocoeso

Os menores valores de produtividade (Figura 7) foram encontrados na porção nordeste do campo experimental e os maiores na parte central e na extremidade noroeste do campo experimental. O número de espigas por planta e peso de 100 grãos seguiram o mesmo padrão dos encontrados para produtividade enquanto o número de grãos por espiga obteve maior abrangência no nível de 400-519 com 87,29% da área. A produtividade na porção nordeste do campo experimental não condiz com a qualidade física, pois esta área apresentou bons resultados para os indicadores físicos do solo e baixa produtividade, essa condição reforça a teoria de ter acontecido competição por luz entre a glirícidia e o milho.



**Figura 7** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da produtividade (A) numero de espigas por planta (B) grãos por espiga (C) e peso de 100 grãos (D) do milho em um Latossolo Amarelo Distrocoeso

Os menores valores de produtividade foram encontrados na porção nordeste do campo experimental e os maiores na parte central e na extremidade noroeste do campo experimental. O número de espigas por planta e peso de 100 grãos seguiram o mesmo padrão dos encontrados para produtividade enquanto o número de grãos por espiga obteve maior abrangência no nível de 400-519 com 87,29% da área.

As correlações entre os atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho com os dados de todos os pontos amostrais não resultou em correlações significativas, tais resultados podem ter sido provocados pela competição, principalmente por luz, entre os

componentes arbóreos e a cultura do milho. A competição foi mais sensível na porção nordeste do campo experimental na área implantada com glirícidia em função do manejo inadequado no desenvolvimento das culturas, o que pode ser constatado nos mapas de isolinhas dos componentes de produtividade do milho.

A partir destes resultados mostrou-se necessário fazer a correlação com dados oriundos de áreas onde não foi observada competição. Para isso foram utilizados 180 pontos da grade amostral localizados nas áreas sem leguminosas (90 pontos) e com leucena (90 pontos).

As correlações das 21 variáveis estudadas (Tabela 4), atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho, localizados nas áreas sem leguminosas e com leucena, resultaram em correlação significativa ( $P < 0,05$ ) em 94 dos 210 pares. Os atributos físicos do solo, porosidade total, índice de avaliação física do solo e umidade volumétrica apresentaram correlações positivas com a produtividade, indicando função crescente entre causa e efeito, e o inverso para a correlação negativa, que foi encontrada com os atributos densidade do solo, teor de areia fina e com a resistência a penetração nas profundidades 6 – 10 cm, 11 – 15 cm, 16 – 20 cm e 0 -20 cm e pressão máxima. Resultados contrastantes foram encontrados por Lustosa Santos (2006) que não encontraram correlação entre a densidade do solo e produtividade do milho.

No geral, as correlações lineares simples entre as variáveis independentes do solo com a variável dependente de produtividade apresentaram coeficientes de correlação baixos, os maiores coeficientes foram para resistência à penetração nas profundidades 11 – 15 cm ( $r = -0,30$ ) e 16 – 20 cm ( $r = -0,31$ ) e pressão máxima ( $r = 0,34$ ). Assim, com determinada reserva, devido ao baixo coeficiente de correlação, pôde-se observar que com aumento da resistência a penetração na camada de 11 a 20 cm do solo (RP3 e RP4) e pressão máxima ocorreu uma diminuição da produtividade de grão de milho (Tabela 4), esse resultados são reforçados por Lapen et al. (2001) que afirmam que o milho tem demonstrado resposta negativa ao aumento da resistência a penetração. As variáveis independentes não eram inteiramente independentes uma da outra, no entanto, isto não quer dizer que as correlações identificadas na Tabela 4 foram inconsistentes ao longo do espaço.

Foi observada correlação entre a umidade do solo e a resistência à penetração (Tabela 4) nas profundidades de 11 – 15 cm ( $r = -0,19$ ), 16 – 20 cm ( $r = -0,41$ ) e 0 – 20 cm ( $r = -0,25$ ), com. As correlações negativas entre umidade e resistência a penetração aumentou com a

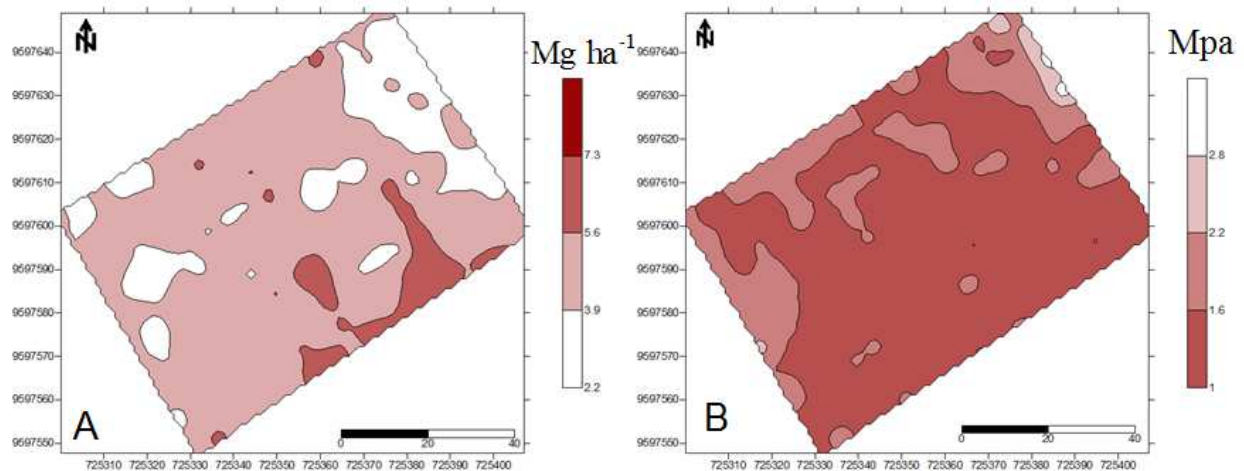
profundidade. A correlação negativa era esperada, porque a resistência à penetração diminui com o aumento do conteúdo de água no solo (Benghough et al., 2001). Os coeficientes de correlações baixos entre a resistência à penetração e umidade na camada de 0 – 10 cm, podem ser atribuídas à influência de outros fatores que não foram mensurados como teor de matéria orgânica.

**Tabela 4.** Matrix de correlação entre atributos físicos do solo e componentes de produtividade do milho, nos sistemas com leguminosa (leucena) e sem leguminosa, em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.

	IAF	Ds	Pt	%S	MAC	ARG	TAF	TAG	TSIL	UM	PM	PPM	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	PROD	NE/P	P100	
<i>Ds</i>	<b>-0.8*</b>	1																			
<i>Pt</i>	<b>0.71*</b>	<b>-0.86*</b>	1																		
<i>%S</i>	<b>0.33*</b>	-0.07	0.1	1																	
MAC	<b>0.48*</b>	<b>-0.25*</b>	<b>0.22*</b>	<b>0.44*</b>	1																
TARG	0.11	<b>-0.18*</b>	<b>0.17*</b>	0.14	<b>-0.17*</b>	1															
TAF	-0.02	0.08	-0.06	<b>-0.3*</b>	0.14	<b>-0.35*</b>	1														
TAG	0.09	-0.12	0.07	<b>-0.18*</b>	<b>0.22*</b>	<b>-0.34*</b>	<b>-0.18*</b>														
TSIL	<b>-0.17*</b>	<b>0.2*</b>	<b>-0.18*</b>	<b>0.23*</b>	-0.1	<b>-0.54*</b>	<b>-0.37*</b>	<b>-0.15*</b>	1												
UM	-0.06	0.01	-0.01	0.09	<b>-0.27*</b>	0.09	<b>-0.15*</b>	<b>-0.23*</b>	<b>0.2*</b>	1											
PM	<b>-0.32*</b>	<b>0.15*</b>	-0.14	-0.16	-0.11	0.11	0.09	-0.09	-0.14	<b>-0.33*</b>	1										
PPM	0.09	0.02	0.02	-0.11	0.06	<b>-0.17*</b>	0.1	0.14	0	-0.14	-0.13	1									
RP1	-0.13	-0.01	-0.03	-0.07	-0.05	-0.02	-0.02	0.01	0.03	-0.04	<b>0.19*</b>	<b>-0.25*</b>	1								
RP2	<b>-0.27*</b>	-0.01	-0.05	-0.04	-0.08	0.13	-0.02	-0.16	-0.01	-0.11	<b>0.58*</b>	<b>-0.44*</b>	<b>0.41*</b>	1							
RP3	<b>-0.28*</b>	0.01	-0.1	-0.1	-0.08	0.1	0.08	-0.13	-0.09	<b>-0.19*</b>	<b>0.62*</b>	<b>-0.33*</b>	<b>0.31*</b>	<b>0.69*</b>	1						
RP4	<b>-0.23*</b>	0.1	-0.1	-0.14	0.05	-0.01	<b>0.16*</b>	0.04	<b>-0.15*</b>	<b>-0.41*</b>	<b>0.71*</b>	0.08	0.13	<b>0.37*</b>	<b>0.5*</b>	1					
RP5	<b>-0.26*</b>	-0.04	-0.04	-0.12	-0.04	0.1	0.07	-0.09	-0.1	<b>-0.25*</b>	<b>0.69*</b>	<b>-0.34*</b>	<b>0.4*</b>	<b>0.86*</b>	<b>0.84*</b>	<b>0.68*</b>	1				
PROD	<b>0.15*</b>	<b>-0.17*</b>	<b>0.21*</b>	0.11	0.01	0.04	<b>-0.21*</b>	0.1	0.08	<b>0.25*</b>	<b>-0.34*</b>	0.12	-0.11	<b>-0.19*</b>	<b>-0.3*</b>	<b>-0.31*</b>	<b>-0.28*</b>	1			
NE/P	0.06	-0.1	<b>0.18*</b>	<b>0.17*</b>	0.01	0.09	<b>-0.18*</b>	0	0.06	0.13	<b>-0.23*</b>	0.04	-0.1	<b>-0.17*</b>	<b>-0.16*</b>	<b>-0.23*</b>	<b>-0.22*</b>	<b>0.76*</b>	1		
P100	<b>0.17*</b>	<b>-0.23*</b>	<b>0.19*</b>	-0.09	0.04	-0.04	-0.09	0.12	0.03	0.1	<b>-0.15*</b>	0.04	0	-0.03	<b>-0.15*</b>	<b>-0.16*</b>	-0.1	<b>0.62*</b>	<b>0.25*</b>	1	
G/E	0.04	0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.06	-0.06	0.12	0.03	<b>0.23*</b>	<b>-0.27*</b>	<b>0.16*</b>	-0.11	<b>-0.16*</b>	<b>-0.29*</b>	<b>-0.21*</b>	<b>-0.23*</b>	<b>0.46*</b>	-0.07	0.14	

IAF = índice de avaliação física do solo; Ds= densidade do solo; Pt = porosidade total, %S = percentagem de saturação; MAC = macroporosidade; PM = pressão máxima,; PPM = profundidade da pressão máxima, TARG= teor de argila, TAF = teor de areia fina; TAG = teor de areia grossa; TSIL = teor de silte; RP1= resistência a penetração 0-5 cm, RP2 = RP 6-10 cm; RP3 = RP 11-15 cm; RP4 = RP 16-20; RP5 = RP 0-20 cm; PROD= produtividade do milho; NE/P = numero de espigas por planta; P100 = peso de 100 grãos e G/E = grãos por espiga.

Os mapas de isolinhas da distribuição espacial da pressão máxima e produtividade do milho (Figura 8) nos sistemas, com leguminosa (leucena) e sem leguminosa, reforçam os resultados expressados na matrix de correlações ( $r = -0,34$ ), por meio da análise visual da variabilidade espacial é possível observar zonas semelhantes entre os mapas de pressão máxima e produtividade do milho. Zonas onde ocorreram pressão máxima elevada, acima de 1,6 Mpa, são visualmente as mesmas zonas em que a produtividade foi abaixo de 3,9 Mg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 8** Mapas de isolinhas da distribuição espacial da produtividade do milho (A) e pressão máxima (B), nos sistemas com leguminosa (leucena) e sem leguminosa, em um Latossolo Amarelo Distrocoeso.

## **Conclusões**

Os atributos físicos do solo e componentes de produtividade apresentaram dependência espacial forte e ajustando-se ao modelo exponencial para a maioria das variáveis. A grade experimental mostrou-se adequada para a avaliação da dependência espacial das variáveis estudadas e a malha amostral para os atributos físicos do solo estudados variou de 4,5 a 458 m.

A produtividade do milho foi correlacionada com a umidade volumétrica, resistência à penetração na camada de 11 a 20 cm, pressão máxima, porosidade total, densidade do solo e teor de areia fina, o que evidenciou a influência destes atributos na produtividade do milho, portanto podem ser utilizados como indicadores físicos no delineamento de zonas de manejo específico para o cultivo do milho.

## Referências

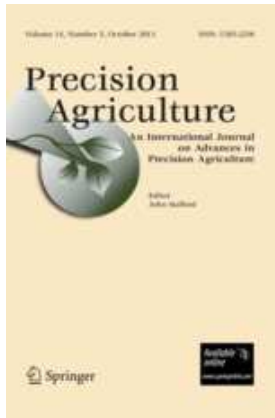
- Amado, T. J. C., Pontelli, C. B., Santi, A. L., Viana, J. H. M., & Sulzbach, L. A. d. S. (2007). Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. *Embrapa Informação Tecnológica*, 42(8), doi:10.1590/s0100-204x2007000800006.
- Amirinejad, A. A., Kamble, K., Aggarwal, P., Chakraborty, D., Pradhan, S., & Mittal, R. B. (2011). Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. *Geoderma*, 160(3–4), 292-303, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.021.
- Bai, Y. (2001). Research of Structure of Quality Education Course, 129.
- Baxter, S. J., Oliver, M. A., & Gaunt, J. (2003). A geostatistical analysis of the spatial variation of soil mineral nitrogen and potentially available nitrogen within an arable field. *Precision Agriculture*, 4(2), 213-226.
- Bengough, A.G., Campbell, D.J., O'Sullivan, M.F., 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Marcel Decker, New York, USA, pp. 377–404.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Novak, J. M., Turco, R. F., et al. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58(5), 1501-1511, doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5952-5959, doi:10.1073/pnas.96.11.5952.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120(3–4), 227-239, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.006.
- Dexter, A. R., & Czyż, E. A. (2000). Soil Physical Quality and the Effects of Management. In M. J. Wilson, & B. Maliszewska-Kordybach (Eds.), *Soil Quality, Sustainable Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe* (Vol. 69, pp. 153-165, NATO Science Series): Springer Netherlands.
- Du, Z., Liu, S., Li, K., & Ren, T. (2009). Soil organic carbon and physical quality as influenced by long-term application of residue and mineral fertiliser in the North China Plain. *Soil Research*, 47(6), 585-591, doi:http://dx.doi.org/10.1071/SR09010.
- Duffera, M., White, J. G., & Weisz, R. (2007). Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. *Geoderma*, 137(3–4), 327-339, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.018.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2ª. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 212 p., 1997.
- Fleming, K. L., Westfall, D. G., Wiens, D. W., & Brodahl, M. C. (2000). Evaluating Farmer Defined Management Zone Maps for Variable Rate Fertilizer Application. *Precision Agriculture*, 2(2), 201-215, doi:10.1023/a:1011481832064.



- Franzen, D. W., Hopkins, D. H., Sweeney, M. D., Ulmer, M. K., & Halvorson, A. D. (2002). Evaluation of Soil Survey Scale for Zone Development of Site-Specific Nitrogen Management. *Agron. J.*, 94(2), 381-389, doi:10.2134/agronj2002.3810.
- GOLDEN SOFTWARE. Surfer Version 7 – Surface Mapping System. Golden, Golden Software, 1999.
- Gupta, R. P., & Abrol, I. P. (1993). A study of some tillage practices for sustainable crop production in India. *Soil and Tillage Research*, 27(1–4), 253-272, doi:http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(93)90071-V.
- Hochman, Z., Carberry, P. S., Robertson, M. J., Gaydon, D. S., Bell, L. W., & McIntosh, P. C. (2013). Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *European Journal of Agronomy*, 44(0), 109-123, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2011.11.003.
- Hörbe, T. A. N., Amado, T. J. C., Ferreira, A. O., & Alba, P. J. (2013). Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4), 450-465, doi:10.1007/s11119-013-9308-7.
- Huang, S. W., & Jin, J. Y. (2002). Advance in study on spatial variability of soil properties. *Soils and Fertilizers*, 1(1), 8-14.
- Iqbal, J., Thomasson, J. A., Jenkins, J. N., Owens, P. R., & Whisler, F. D. (2005). Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils This study was in part supported by The National Aeronautical and Space Administration funded Remote Sensing Technology Center at Mississippi State University. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69(4), 1338-1350, doi:10.2136/sssaj2004.0154.
- Isaaks E.H. and Srivastava R.M., 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 561p.
- Robertson, G. P. *GS+: Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide*. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. 152p.
- Jayawardane, N., & Chan, K. (1994). The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils - a review. *Soil Research*, 32(1), 13-44, doi:http://dx.doi.org/10.1071/SR9940013.
- Jin, J., & Jiang, C. (2002). Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P.R. China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 165-172, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00099-6.
- Kılıç, K., Özgöz, E., & Akbaş, F. (2004). Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76(1), 1-11, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2003.08.009.
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y. (2005). Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 285-308, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012.
- Lapen, D. R., Topp, G. C., Gregorich, E. G., Hayhoe, H. N., & Curnoe, W. E. (2001). Divisive field-scale associations between corn yields, management, and soil information. *Soil and Tillage Research*, 58(3–4), 193-206, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00168-9.
- Little, T. M. and Hills, F. J. (1978). *Agricultural Experimentation Design and Analysis*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

- Lustosa Santos, M., de Passos e Carvalho, Morel, Alves Rapassi, Rosalina Maria, Tacaoca Muraishi, Cid, Maller, Adriano, Araújo Matos, Flávia. (2006). Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 28(Julio-Septiembre)(3), 9, doi:Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026570016>>
- Moura, E. G. Oliveira A. K. Coutinho, C., G. Pinheiro K. M. e Aguiar A. C. F. (2012). Management of a cohesive tropical soil to enhance rootability and increase the efficiency of nitrogen and potassium use. *Soil Use and Management*, 28(3), 370-377, doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00424.x.
- Mulla, D. J., & Schepers, J. S. (1997). Key Processes and Properties for Site-Specific Soil and Crop Management. In F. J. Pierce, & E. J. Sadler (Eds.), *The State of Site-Specific Management for Agriculture* (pp. 1-18): American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Mullins, C. E., MacLeod, D. A., Northcote, K. H., Tisdall, J. M., & Young, I. M. (1990). Hardsetting Soils: Behavior, Occurrence, and Management. In R. Lal, & B. A. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science* (Vol. 11, pp. 37-108, *Advances in Soil Science*): Springer New York.
- NeSmith, D. S., Radcliffe, D. E., Hargrove, W. L., Clark, R. L., & Tollner, E. W. (1987). Soil Compaction in Double-cropped Wheat and Soybeans on an Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51(1), 183-186, doi:10.2136/sssaj1987.03615995005100010038x.
- Nielsen, D. R., J. W. Biggar, and K. T. Erh, Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42, 214-259, 1973.
- Ortega, R. A., & Santibáñez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1), 49-59, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.011>.
- Paz-González, A., Vieira, S. R., & Taboada Castro, M. T. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97(3-4), 273-292, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5).
- Souza, Z. M.; Marques Junior, J.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.6, p.937-944, nov./dez. 2004.
- Taylor, H. M., ROBERSON, G. M., & PARKER, J. J. J. (1966). Soil Strength-Root Penetration Relations for Medium- to Coarse-Textured Soil Materials. *Soil Science*, 102(1), 18-22.
- Thomasson, A. J. (1978). TOWARDS AN OBJECTIVE CLASSIFICATION OF SOIL STRUCTURE. *Journal of Soil Science*, 29(1), 38-46, doi:10.1111/j.1365-2389.1978.tb02029.x.
- Topp, G. C., Reynolds, W. D., Cook, F. J., Kirby, J. M., & Carter, M. R. (1997). Chapter 2 Physical attributes of soil quality. In E. G. Gregorich, & M. R. Carter (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. Volume 25, pp. 21-58): Elsevier.
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). 13 - Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field. In D. Hillel (Ed.), *Applications of Soil Physics* (pp. 319-344): Academic Press.
- Webster, R. (1985). Quantitative Spatial Analysis of Soil in the Field. In B. A. Stewart (Ed.), *Advances in Soil Science* (Vol. 3, pp. 1-70, *Advances in Soil Science*): Springer New York.

Whelan, B. M., & McBratney, A. B. (2000). The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precision Agriculture*, 2(3), 265-279, doi:10.1023/a:1011838806489.



## Precision Agriculture

---

An International Journal on Advances in Precision Agriculture

Co-Editor: J. **Stafford**; P. **Carter**

ISSN: 1385-2256 (print version)

ISSN: 1573-1618 (electronic version)

Journal no. 11119

---

### Instructions for Authors

## Instructions for Authors

#### EDITORIAL PROCEDURE

The journal follows a single blind reviewing procedure.

#### TYPES OF PAPERS

Original Papers, review Papers, Brief communication, Short communication,

#### MANUSCRIPT SUBMISSION

##### Manuscript Submission

Submission of a manuscript implies: that the work described has not been published before; that it is not under consideration for publication anywhere else; that its publication has been approved by all co-authors, if any, as well as by the responsible authorities – tacitly or explicitly – at the institute where the work has been carried out. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation.

##### Permissions

Authors wishing to include figures, tables, or text passages that have already been published elsewhere are required to obtain permission from the copyright owner(s) for both the print and online format and to include evidence that such permission has been granted when submitting their papers. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the authors.

##### Online Submission

Authors should submit their manuscripts online. Electronic submission substantially reduces the editorial processing and reviewing times and shortens overall publication times. Please follow the hyperlink “Submit online” on the right and upload all of your manuscript files following the instructions given on the screen.

## TITLE PAGE

### Title Page

The title page should include:

- The name(s) of the author(s)
- A concise and informative title
- The affiliation(s) and address(es) of the author(s)
- The e-mail address, telephone and fax numbers of the corresponding author

### Abstract

Please provide an abstract of 150 to 250 words. The abstract should not contain any undefined abbreviations or unspecified references.

### Keywords

Please provide 4 to 6 keywords which can be used for indexing purposes.

## TEXT

### Text Formatting

Manuscripts should be submitted in Word.

- ⌘ Use a normal, plain font (e.g., 10-point Times Roman) for text.
- ⌘ Use italics for emphasis.
- ⌘ Use the automatic page numbering function to number the pages.
- ⌘ Do not use field functions.
- ⌘ Use tab stops or other commands for indents, not the space bar.
- ⌘ Use the table function, not spreadsheets, to make tables.
- ⌘ Use the equation editor or MathType for equations.
- ⌘ Save your file in docx format (Word 2007 or higher) or doc format (older Word versions).

### Headings

Please use no more than three levels of displayed headings.

### Abbreviations

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter.

### Footnotes

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. They should not consist solely of a reference citation, and they should never include the bibliographic details of a reference. They should also not contain any figures or tables.

Footnotes to the text are numbered consecutively; those to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data).

Footnotes to the title or the authors of the article are not given reference symbols.

Always use footnotes instead of endnotes.

#### Acknowledgments

Acknowledgments of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

#### SCIENTIFIC STYLE

Please always use internationally accepted signs and symbols for units (SI units).

#### SCIENTIFIC STYLE

Generic names of drugs and pesticides are preferred; if trade names are used, the generic name should be given at first mention.

#### SCIENTIFIC STYLE

Please use the standard mathematical notation for formulae, symbols etc.:

- Italic for single letters that denote mathematical constants, variables, and unknown quantities
- Roman/upright for numerals, operators, and punctuation, and commonly defined functions or abbreviations, e.g., cos, det, e or exp, lim, log, max, min, sin, tan, d (for derivative)
- Bold for vectors, tensors, and matrices.

#### REFERENCES

##### Citation

Cite references in the text by name and year in parentheses. Some examples:

- Negotiation research spans many disciplines (Thompson 1990).
- This result was later contradicted by Becker and Seligman (1996).
- This effect has been widely studied (Abbott 1991; Barakat et al. 1995; Kelso and Smith 1998; Medvec et al. 1999).

##### Reference list

The list of references should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should only be mentioned in the text. Do not use footnotes or endnotes as a substitute for a reference list.

Reference list entries should be alphabetized by the last names of the first author of each work.

##### • Journal article

Harris, M., Karper, E., Stacks, G., Hoffman, D., DeNiro, R., Cruz, P., et al. (2001). Writing labs and the Hollywood connection. *Journal of Film Writing*, 44(3), 213–245.

- ⌘ Article by DOI

Slifka, M. K., & Whitton, J. L. (2000) Clinical implications of dysregulated cytokine production. *Journal of Molecular Medicine*, doi:10.1007/s001090000086

- ⌘ Book

Calfee, R. C., & Valencia, R. R. (1991). *APA guide to preparing manuscripts for journal publication*. Washington, DC: American Psychological Association.

- ⌘ Book chapter

O'Neil, J. M., & Egan, J. (1992). Men's and women's gender role journeys: Metaphor for healing, transition, and transformation. In B. R. Wainrib (Ed.), *Gender issues across the life cycle* (pp. 107–123). New York: Springer.

- ⌘ Online document

Abou-Allaban, Y., Dell, M. L., Greenberg, W., Lomax, J., Peteet, J., Torres, M., & Cowell, V. (2006). Religious/spiritual commitments and psychiatric practice. Resource document. American Psychiatric Association.  
[http://www.psych.org/edu/other\\_res/lib\\_archives/archives/200604.pdf](http://www.psych.org/edu/other_res/lib_archives/archives/200604.pdf). Accessed 25 June 2007.

Journal names and book titles should be italicized.

For authors using EndNote, Springer provides an output style that supports the formatting of in-text citations and reference list.

EndNote style (zip, 3 kB)

## TABLES

- ⌘ All tables are to be numbered using Arabic numerals.
- ⌘ Tables should always be cited in text in consecutive numerical order.
- ⌘ For each table, please supply a table caption (title) explaining the components of the table.
- ⌘ Identify any previously published material by giving the original source in the form of a reference at the end of the table caption.
- ⌘ Footnotes to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data) and included beneath the table body.

## ARTWORK AND ILLUSTRATIONS GUIDELINES

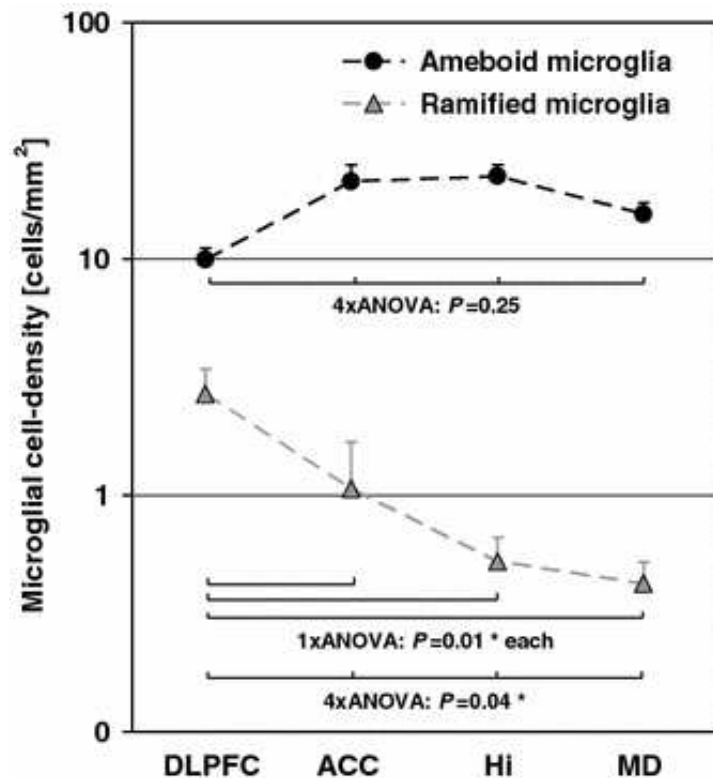
For the best quality final product, it is highly recommended that you submit all of your artwork – photographs, line drawings, etc. – in an electronic format. Your art will then be produced to the highest standards with the greatest accuracy to detail. The published work will directly reflect the quality of the artwork provided.

### Electronic Figure Submission

- ⌘ Supply all figures electronically.
- ⌘ Indicate what graphics program was used to create the artwork.
- ⌘ For vector graphics, the preferred format is EPS; for halftones, please use TIFF format. MS Office files are also acceptable.

- ⌘ Vector graphics containing fonts must have the fonts embedded in the files.
- ⌘ Name your figure files with "Fig" and the figure number, e.g., Fig1.eps.

## Line Art

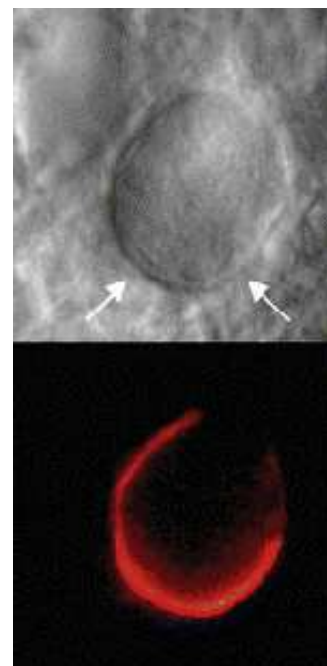


- ⌘ Definition: Black and white graphic with no shading.
- ⌘ Do not use faint lines and/or lettering and check that all lines and lettering within the figures are legible at final size.
- ⌘ All lines should be at least 0.1 mm (0.3 pt) wide.
- ⌘ Scanned line drawings and line drawings in bitmap format should have a minimum resolution of 1200 dpi.
- ⌘ Vector graphics containing fonts must have the fonts embedded in the files.

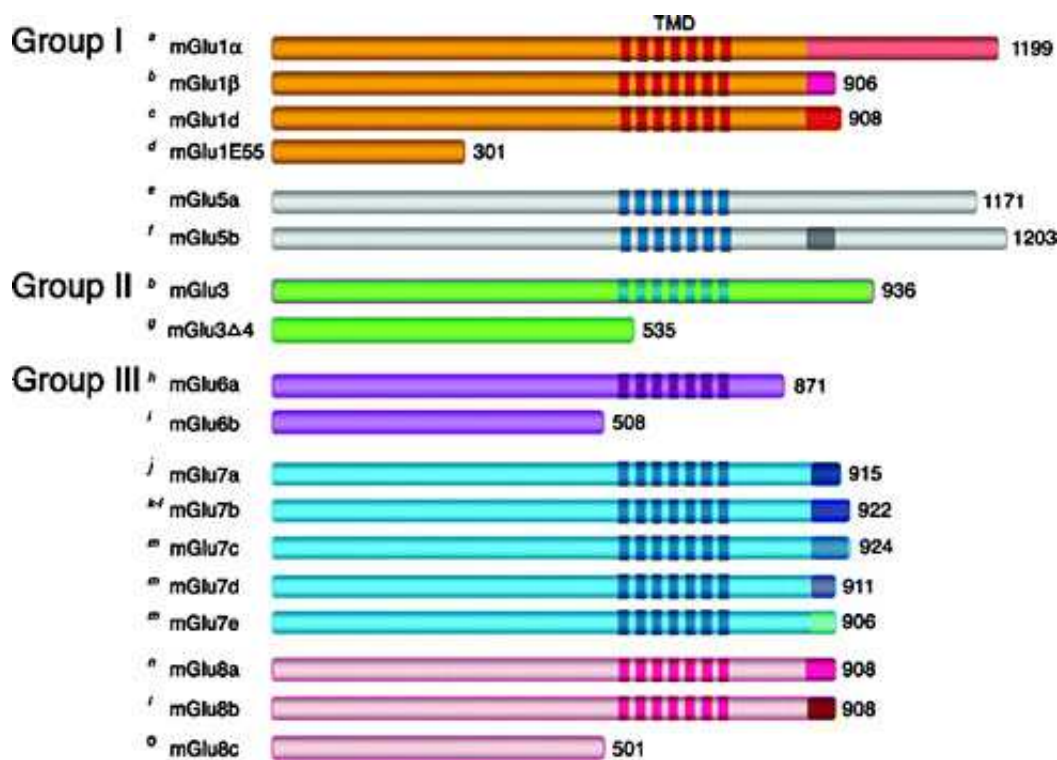
## Halftone Art

- Definition: Photographs, drawings, or paintings with fine shading, etc.
- If any magnification is used in the photographs, indicate this by using scale bars within the figures themselves.
- Halftones should have a minimum resolution of 300 dpi.





Combination Art



- Definition: a combination of halftone and line art, e.g., halftones containing line drawing, extensive lettering, color diagrams, etc.
- Combination artwork should have a minimum resolution of 600 dpi.

Color Art

- Color art is free of charge for online publication.
- If black and white will be shown in the print version, make sure that the main information will still be visible. Many colors are not distinguishable from one

another when converted to black and white. A simple way to check this is to make a xerographic copy to see if the necessary distinctions between the different colors are still apparent.

- If the figures will be printed in black and white, do not refer to color in the captions.
- Color illustrations should be submitted as RGB (8 bits per channel).

#### Figure Lettering

- ✎ To add lettering, it is best to use Helvetica or Arial (sans serif fonts).
- ✎ Keep lettering consistently sized throughout your final-sized artwork, usually about 2–3 mm (8–12 pt).
- ✎ Variance of type size within an illustration should be minimal, e.g., do not use 8-pt type on an axis and 20-pt type for the axis label.
- ✎ Avoid effects such as shading, outline letters, etc.
- ✎ Do not include titles or captions within your illustrations.

#### Figure Numbering

- All figures are to be numbered using Arabic numerals.
- Figures should always be cited in text in consecutive numerical order.
- Figure parts should be denoted by lowercase letters (a, b, c, etc.).
- If an appendix appears in your article and it contains one or more figures, continue the consecutive numbering of the main text. Do not number the appendix figures, "A1, A2, A3, etc." Figures in online appendices (Electronic Supplementary Material) should, however, be numbered separately.

#### Figure Captions

- ✎ Each figure should have a concise caption describing accurately what the figure depicts. Include the captions in the text file of the manuscript, not in the figure file.
- ✎ Figure captions begin with the term **Fig.** in bold type, followed by the figure number, also in bold type.
- ✎ No punctuation is to be included after the number, nor is any punctuation to be placed at the end of the caption.
- ✎ Identify all elements found in the figure in the figure caption; and use boxes, circles, etc., as coordinate points in graphs.
- ✎ Identify previously published material by giving the original source in the form of a reference citation at the end of the figure caption.

#### Figure Placement and Size

- When preparing your figures, size figures to fit in the column width.
- For most journals the figures should be 39 mm, 84 mm, 129 mm, or 174 mm wide and not higher than 234 mm.
- For books and book-sized journals, the figures should be 80 mm or 122 mm wide and not higher than 198 mm.

#### Permissions

If you include figures that have already been published elsewhere, you must obtain

permission from the copyright owner(s) for both the print and online format. Please be aware that some publishers do not grant electronic rights for free and that Springer will not be able to refund any costs that may have occurred to receive these permissions. In such cases, material from other sources should be used.

#### Accessibility

In order to give people of all abilities and disabilities access to the content of your figures, please make sure that

- All figures have descriptive captions (blind users could then use a text-to-speech software or a text-to-Braille hardware)
- Patterns are used instead of or in addition to colors for conveying information (color-blind users would then be able to distinguish the visual elements)
- Any figure lettering has a contrast ratio of at least 4.5:1

#### ELECTRONIC SUPPLEMENTARY MATERIAL

Springer accepts electronic multimedia files (animations, movies, audio, etc.) and other supplementary files to be published online along with an article or a book chapter. This feature can add dimension to the author's article, as certain information cannot be printed or is more convenient in electronic form.

#### Submission

- Supply all supplementary material in standard file formats.
- Please include in each file the following information: article title, journal name, author names; affiliation and e-mail address of the corresponding author.
- To accommodate user downloads, please keep in mind that larger-sized files may require very long download times and that some users may experience other problems during downloading.

#### Audio, Video, and Animations

- Always use MPEG-1 (.mpg) format.

#### Text and Presentations

- Submit your material in PDF format; .doc or .ppt files are not suitable for long-term viability.
- A collection of figures may also be combined in a PDF file.

#### Spreadsheets

- Spreadsheets should be converted to PDF if no interaction with the data is intended.
- If the readers should be encouraged to make their own calculations, spreadsheets should be submitted as .xls files (MS Excel).

#### Specialized Formats

- Specialized format such as .pdb (chemical), .vrl (VRML), .nb (Mathematica notebook), and .tex can also be supplied.

#### Collecting Multiple Files

- It is possible to collect multiple files in a .zip or .gz file.

#### Numbering

- If supplying any supplementary material, the text must make specific mention of the material as a citation, similar to that of figures and tables.
- Refer to the supplementary files as “Online Resource”, e.g., "... as shown in the animation (Online Resource 3)", "... additional data are given in Online Resource 4”.
- Name the files consecutively, e.g. “ESM\_3.mpg”, “ESM\_4.pdf”.

#### Captions

- For each supplementary material, please supply a concise caption describing the content of the file.

#### Processing of supplementary files

- Electronic supplementary material will be published as received from the author without any conversion, editing, or reformatting.

#### Accessibility

In order to give people of all abilities and disabilities access to the content of your supplementary files, please make sure that

- The manuscript contains a descriptive caption for each supplementary material
- Video files do not contain anything that flashes more than three times per second (so that users prone to seizures caused by such effects are not put at risk)

#### CONFLICT OF INTEREST

All benefits in any form from a commercial party related directly or indirectly to the subject of this manuscript or any of the authors must be acknowledged. For each source of funds, both the research funder and the grant number should be given. This note should be added in a separate section before the reference list.

If no conflict exists, authors should state: The authors declare that they have no conflict of interest.

#### DOES SPRINGER PROVIDE ENGLISH LANGUAGE SUPPORT?

Manuscripts that are accepted for publication will be checked by our copyeditors for spelling and formal style. This may not be sufficient if English is not your native language and substantial editing would be required. In that case, you may want to have your manuscript edited by a native speaker prior to submission. A clear and concise language will help editors and reviewers concentrate on the scientific content of your paper and thus smooth the peer review process.

The following editing service provides language editing for scientific articles in all areas Springer publishes in.

Use of an editing service is neither a requirement nor a guarantee of acceptance for publication.

Please contact the editing service directly to make arrangements for editing and payment.

#### For Authors from China

文章在投稿前进行专业的语言润色将对作者的投稿进程有所帮助。作者可自愿选择使用Springer推荐的编辑服务，使用与否并不作为判断文章是否被录用的依据。提高文章的语言质量将有助于审稿人理解文章的内容，通过对学术内容的判断来决定文章的取舍，而不会因为语言问题导致直接退稿。作者需自行联系Springer推荐的编辑服务公司，协商编辑事宜。

理文编辑

### For Authors from Japan

ジャーナルに論文を投稿する前に、ネイティブ・スピーカーによる英文校閲を希望されている方には、Edanz社をご紹介します。サービス内容、料金および申込方法など、日本語による詳しい説明はエダンズグループジャパン株式会社の下記サイトをご覧ください。

エダンズ グループ ジャパン

### For Authors from Korea

영어 논문 투고에 앞서 원어민에게 영문 교정을 받고자 하시는 분들께 Edanz 회사를 소개해 드립니다. 서비스 내용, 가격 및

신청 방법 등에 대한 자세한 사항은 저희 Edanz Editing Global 웹사이트를 참조해 주시면 감사하겠습니다.

Edanz Editing Global

### AFTER ACCEPTANCE

Upon acceptance of your article you will receive a link to the special Author Query Application at Springer's web page where you can sign the Copyright Transfer Statement online and indicate whether you wish to order OpenChoice, offprints, or printing of figures in color.

Once the Author Query Application has been completed, your article will be processed and you will receive the proofs.

#### Open Choice

In addition to the normal publication process (whereby an article is submitted to the journal and access to that article is granted to customers who have purchased a subscription), Springer provides an alternative publishing option: Springer Open Choice. A Springer Open Choice article receives all the benefits of a regular subscription-based article, but in addition is made available publicly through Springer's online platform SpringerLink.

Springer Open Choice

#### Copyright transfer

Authors will be asked to transfer copyright of the article to the Publisher (or grant the Publisher exclusive publication and dissemination rights). This will ensure the widest possible protection and dissemination of information under copyright laws.

Open Choice articles do not require transfer of copyright as the copyright remains with the author. In opting for open access, the author(s) agree to publish the article under the Creative Commons Attribution License.

#### Offprints

Offprints can be ordered by the corresponding author.

#### Color illustrations

Online publication of color illustrations is free of charge. For color in the print version, authors will be expected to make a contribution towards the extra costs.

#### Proof reading

The purpose of the proof is to check for typesetting or conversion errors and the completeness and accuracy of the text, tables and figures. Substantial changes in content,

e.g., new results, corrected values, title and authorship, are not allowed without the approval of the Editor.

After online publication, further changes can only be made in the form of an Erratum, which will be hyperlinked to the article.

#### Online First

The article will be published online after receipt of the corrected proofs. This is the official first publication citable with the DOI. After release of the printed version, the paper can also be cited by issue and page numbers.

---

© Springer faz parte do Springer Science+Business Media