

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS - UFGD

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO
E CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DA SOJA**

DIEGO COSTA POTRICH

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2012**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E
CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA
SOJA**

DIEGO COSTA POTRICH
Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROF^o. DR^o. EDGARD JARDIM ROSA JUNIOR

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

Dourados
Mato Grosso do Sul
2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central - UFGD

633.34098171 Potrich, Diego Costa.
P864v Variabilidade espacial de atributos do solo e
correlação com a produtividade da cultura da soja /
Diego Costa Potrich – Dourados- MS : UFGD, 2012.
55 f.

Orientador: Prof. Dr. Edgard Jardim Rosa Junior.
Dissertação (Mestrado em Agronomia)
Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Soja – Cultivo. 2. Solo – Qualidade. 3.
Geoestatística. I. Título.

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E CORRELAÇÃO
COM A PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA**

por

Diego Costa Potrich

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

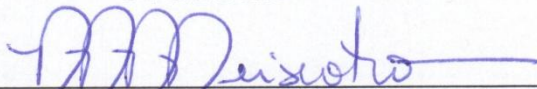
Aprovada em: 26/09/2012



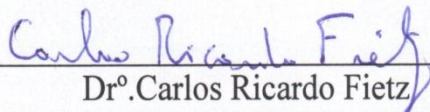
Prof. Dr.º Edgard. Jardim Rosa Junior
UFGD/FCA



Prof.ª Dr.ª Anamari V. de A. Motomiya
UFGD/FCA



Prof.ª Dr.ª Paula P. P. Peixoto
UFGD/FCA



Dr.º Carlos Ricardo Fietz
Pesquisador da EMBRAPA/CPAO

DEDICO.

Aos meus pais Edelir Pedro Potrich e Salvani da Costa Potrich, e ao meu irmão Douglas Costa Potrich por todo carinho, amor, dedicação, confiança, respeito e amizade. Também meu tio Lindoval Bezerra Costa, uma pessoa especial, que sempre proporciona muita alegria. Quero destacar dois primos, Jhovan Meurer Potrich e Djhonatan Meurer Potrich, verdadeiros companheiros, meus irmãos de coração. E a todos os demais integrantes das famílias Costa & Potrich, que sempre estiveram ao meu lado, contribuindo para minha formação ética e moral.

OFEREÇO.

*A Deus,
ao Meu orientador Edgard Jardim Rosa Junior e
ao meu amigo Vitor Danilo da Silva Fernandes (in memoriam)*

“Destruam as cidades e conservem os campos, e as cidades ressurgirão. Destruam os campos e conservem as cidades, e estas sucumbirão”

ABRAHAM LINCOLN

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre à minha frente guiando, iluminando e protegendo a minha vida e o meu caminho. Agradeço também a saúde, alegrias, tristezas e a imensa força divina que abençoa as minhas conquistas.

À Universidade Federal da Grande Dourados, em especial ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade concedida e incentivo à formação e especialização de profissionais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Ao Prof^o. Dr^o. Edgard Jardim Rosa Junior pelo incentivo, amizade e orientação durante a execução desta pesquisa.

À Prof^a. Dr^a. Anamari Viegas de Araujo Motomiya pelos conselhos, paciência, co-orientação e incentivo durante esses anos de convívio.

Aos membros da banca, Prof^a. Dr^a. Anamari Viegas de Araujo Motomiya, Prof^a. Dr^a. Paula Pinheiro Padovese Peixoto e pesquisador Dr^o. Carlos Ricardo Fietz.

Ao amigo Eng^o. Agr^o. Leandro Luiz Montoro Roos pelo apoio, trabalho e amizade. Agradeço também pela disponibilização do campo experimental, funcionários e maquinário da Fazenda Princesa dos Campos.

Às empresas Fundação MS e Integração MS, pela ajuda e apoio de trabalho, em especial ao colega Eng^o. Agr^o. Roney Simões Pedroso pela colaboração e amizade.

Aos meus amigos do Programa de Pós-graduação em Agronomia da UFGD e também da graduação em Engenharia Agrônômica da UFGD, em especial Douglas Costa Potrich, Eber Augusto Ferreira do Prado, Alex Marcel Melotto, Leandro Bassi Moreno, Matheus Andrade Martinez e Pedro Henrique Altomar pelo apoio e trabalho.

Aos técnicos dos Laboratório de Fertilidade do Solo e Física do Solo da UFGD pelo auxílio e paciência durante a realização das análises.

E a todos aqueles que participaram em alguma etapa desse processo, meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Agricultura de precisão	4
2.2. Variabilidade dos atributos do solo e da produção	6
2.3. Geoestatística e krigagem	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1. Local.....	9
3.2. Esquema experimental	9
3.3. Amostragem e determinações	9
3.3.1. Atributos físicos do solo	10
3.3.2. Atributos químicos do solo	10
3.3.3. Produtividade da cultura da soja	11
3.4. Análises estatísticas.....	11
3.4.1. Estatística descritiva.....	11
3.4.2. Análise geoestatística.....	11
3.4.3. Correlação	11
3.5. Interpolação por krigagem e mapeamento	12
3.6. Determinação das classes de interpretação	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1. Produtividade da soja	15
4.2. Atributos físicos do solo	17
4.2.1. Estatística descritiva.....	17
4.2.2. Análise geoestatística.....	21
4.3. Atributos químicos do solo	24
4.3.1. Estatística descritiva.....	24
4.3.2. Análise geoestatística.....	27
4.4. Correlação entre atributo do solo e produtividade da soja.....	30
5. CONCLUSÕES	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
7. ANEXOS I - Semivariogramas.....	42
7.1. Atributos físicos do solo	42
7.2. Atributos químicos do solo	46
8. ANEXOS II - mapeamento da variabilidade	50
8.1. Atributos físicos do solo	50
8.2. Atributos químicos do solo	53

LISTA DE QUADROS

	PÁGINA
QUADRO 1. Classes de interpretação adotadas para os atributos físicos: Densidade do solo - D_s , Macroporosidade - Ma , Microporosidade - Mi , Volume Total de Poros - VTP, Diâmetro Médio Geométrico - DMG, Diâmetro Médio Ponderado - DMP e Resistência à Penetração - RP.....	12
QUADRO 2. Classes de interpretação adotadas para os atributos químicos: Acidez ativa - pH, Fósforo - P, Potássio - K, Cálcio - Ca, Magnésio - Mg, Alumínio - Al, Soma de Bases - SB, Capacidade de Troca Catiônica - CTC, Saturação por Bases - V%, Saturação de K - K%, Saturação de Ca - Ca%, Saturação de Mg - Mg%, Saturação de Al - m%, Zinco - Zn, Cobre - Cu, Manganês - Mn e Ferro - Fe.....	13
QUADRO 3. Resultados da estatística descritiva para produtividade de grãos da soja (kg ha^{-1}), safra 2011/12.....	15
QUADRO 4. Resultados da estatística descritiva para os atributos físicos do solo: Argila (g kg^{-1}), Areia (g kg^{-1}), Silte (g kg^{-1}), Densidade do solo - D_s (mg m^{-3}), Macroporosidade - Ma ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Microporosidade - Mi ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Volume Total de Poros - VTP ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Diâmetro Médio Geométrico - DMG (mm), Diâmetro Médio Ponderado - DMP (mm) e Resistência à Penetração - RP (KPa).....	18
QUADRO 5. Resultados da geoestatística para os atributos físicos do solo: Argila (g kg^{-1}), Areia (g kg^{-1}), Silte (g kg^{-1}), Densidade do solo - D_s (mg m^{-3}), Macroporosidade - Ma ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Microporosidade - Mi ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Volume Total de Poros - VTP ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Diâmetro Médio Geométrico - DMG (mm), Diâmetro Médio Ponderado - DMP (mm) e Resistência à Penetração - RP (KPa).....	22
QUADRO 6. Resultados da estatística descritiva para os atributos químicos do solo: pH em CaCl_2 , P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por bases - V% (%), Saturação de Cálcio - Ca% (%), Saturação de Magnésio - Mg% (%), Saturação de Potássio - K% (%), Saturação de Alumínio - m% (%), Zn (mg dm^{-3}), Cu (mg dm^{-3}), Mn (mg dm^{-3}) e Fe (mg dm^{-3}).....	25

QUADRO 7. Resultados da geoestatística para os atributos químicos do solo: pH em CaCl ₂ , P (mg dm ⁻³), K (cmol _c dm ⁻³), Ca (cmol _c dm ⁻³), Mg (cmol _c dm ⁻³) Al (cmol _c dm ⁻³), SB (cmol _c dm ⁻³), CTC (cmol _c dm ⁻³), V% (%), Zn (mg dm ⁻³), Cu (mg dm ⁻³), Mn (mg dm ⁻³) e Fe (mg dm ⁻³).....	28
--	----

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
FIGURA 1. Detalhamento do polígono da área, especificando-se os pontos amostrais.....	9
FIGURA 2. Semivariograma ajustado aos dados da Ps.....	15
FIGURA 3. Mapa de produtividade da cultura da soja (safra 2011/12).....	16

RESUMO

POTRICH, DIEGO COSTA. Universidade Federal da Grande Dourados, Setembro de 2012. **Variabilidade espacial de atributos do solo e correlação com a produtividade da cultura da soja.** Orientador: Edgard Jardim Rosa Junior. Co-orientadora: Anamari Viegas de Araújo Motomiya.

A Agricultura de Precisão (AP) é uma tecnologia fundamentada na gestão da variabilidade espacial dos componentes de produção, aonde se busca o aumento da eficiência produtiva por meio do manejo regionalizado. Sendo assim, o presente trabalho teve por objetivo determinar a variabilidade espacial e suas respectivas correlações, entre a produtividade da cultura da soja com os atributos físicos e químicos do solo, através de uma amostragem sistemática em grade com espaçamento regular de 70,0 m, totalizando 51 pontos de amostragem. O experimento foi conduzido em uma área experimental de 24,8 ha localizada no município de Maracaju-MS, durante a safra de soja 2011/2012. As variáveis analisadas foram argila, silte, areia, densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), volume total de poros (VTP), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), resistência à penetração (RP), pH em CaCl₂, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB), além das saturações por bases (V%), K (K%), Ca (Ca%), Mg (Mg%) e Al (m%). Já a produtividade da cultura foi aferida ao término de seu ciclo por colheita mecanizada. Os resultados da análise geoestatística indicaram que a grade amostral utilizada foi capaz de identificar a estrutura de variabilidade da produtividade e da maioria dos atributos do solo, podendo ser considerada para a definição de esquemas de amostragem e práticas de manejo. Os valores de alcance variaram de 128,0 a 1176,0 m para os atributos físicos, 113,0 a 378,0 m para os atributos químicos, até 304,0 m para a produtividade da cultura da soja. Quanto a análise de correlação, verificou-se significância apenas para areia, silte e RP até a profundidade de 0,20 m, demonstrando que o estudo individualizado dos fatores físicos e químicos é ineficiente para elucidar a variabilidade da produtividade da cultura soja.

Palavras-chave: dependência espacial, krigagem e compactação do solo.

ABSTRACT

POTRICH, DIEGO COSTA. Universidade Federal da Grande Dourados, September-2012. **Spatial variability of soil attributes and correlation with yield of soybean.** Adviser: Edgard Jardim Rosa Junior. Co-adviser: Anamari Viegas de Araújo Motomiya.

The Precision Agriculture (PA) is a technology based on the management of spatial variability of production's component, where it seeks to increase production efficiency through site-specific crop management. Therefore, this study aimed to determine the spatial variability and their respective correlations between yield of soybeans with the physical and chemical soil, through a systematic sampling grid with regular distance of 70.0 m, totaling 51 sampling points. The experiment was conducted in an experimental area of 24.8 ha located in the town of Maracaju-MS during soybean harvest 2011/2012. The variables were clay, silt, sand, soil density (SD), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), total pore volume (TPV), geometric mean diameter (GMD), mean weight diameter (MWD), resistance penetration (RP), pH CaCl₂, phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), zinc (Zn), copper (Cu), manganese (Mn), iron (Fe), cation exchange capacity (CEC), sum of bases (SB), in addition to base saturations (V%), K (% K), Ca (Ca%) Mg (% Mg) and Al (m%). Already the yield was measured at the end of its cycle by mechanical harvesting. The results of the geostatistical analysis indicated that the sampling grid used was capable of identifying the structure of variability in productivity and most soil properties, however can be considered for defining sampling schemes and management practices. The values range varied from 128.0 to 1176.0 m for the physical attributes, from 113.0 to 378.0 m for the chemical attributes, until 304.0 m for the productivity of soybean. As the correlation analysis, there was significant only for sand, silt and RP to a depth of 0.20 m, demonstrating that the individualized study of physical and chemical factors is inefficient to elucidate the variability of crop yield soybeans.

Key-words: spatial dependence, kriging and soil compactation.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L) Merrill) ocupa posição de destaque na agricultura brasileira. O fato é que, ao longo das últimas décadas observa-se um gradativo crescimento de produtividade e expansão da área plantada, impulsionando um aumento de produção da cultura. Segundo dados da CONAB (2012), cultivou-se cerca de 25,042 milhões de hectares de soja na safra 2011/2012, em todo território brasileiro. Concomitantemente, no Estado de Mato Grosso do Sul, considera-se a principal cultura.

A globalização da economia, combinada ao aumento gradativo do custo de produção e a forte pressão pela qualidade ambiental, tem exigido do setor produtivo uma cultura de sustentabilidade com manutenção de níveis de competitividade internacionais. Desta forma, a eficiência agrícola torna-se, cada vez mais, um pré-requisito para a sobrevivência e permanência do produtor neste setor.

As regiões que tiveram o cerrado como vegetação nativa, onde estão localizados grande parte dos solos agricultáveis do Brasil, merecem grande atenção. Classificados normalmente como Latossolos, os solos de Cerrado são bastante intemperizados, apresentam baixa fertilidade natural e elevada acidez ao longo de todo o perfil, tornando-se necessário que os mesmos sejam manejados, corrigidos e adubados adequadamente, para que possibilitem produtividades compensadoras (LOPES, 1984). Em estado natural, o solo apresenta ótimas características físicas, porém à medida que vai sendo submetido ao uso agrícola, passa a apresentar alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento adequado das plantas (SPERA, et al., 2004).

De modo geral, um solo produtivo deve conservar suas características físicas, químicas e biológicas de forma desejável, capaz de suprir adequadamente a planta em nutrientes e água, além de prover suporte mecânico. A manutenção de uma boa estabilidade estrutural contribui para a conservação do solo, diminuindo a suscetibilidade à compactação e erosão.

O surgimento de novas tecnologias, nas últimas décadas, têm promovido significativas contribuições à produção agrícola. Destacam-se o sistema de plantio direto (SPD) e a agricultura de precisão (AP), sendo que a primeira, principalmente em relação ao controle da erosão e a segunda, ao uso racional de insumos. O emprego conjunto têm propiciado incrementos de produtividade nas culturas e redução dos impactos ambientais (GUEDES FILHO, 2009).

Através da deposição continuada de restos vegetais sobre a superfície do solo e o não revolvimento, o SPD pode promover melhoria da qualidade estrutural do solo e conservação da água, além de suprimir a população de plantas invasoras. A AP, por sua vez, envolve o levantamento e processamento de informações detalhadas e georreferenciadas dos fatores produtivos e da produção de uma área de cultivo, visando definir estratégias de manejo mais eficientes e adequadas. Segundo Molin (1997), a AP busca uma prática agrícola mais eficiente, com otimização de seus recursos, e que cause menor dano ao meio ambiente.

Neste contexto, a intervenção localizada e a aplicação em taxa variada passam a ser as peças centrais da AP, diferenciando-a do sistema de manejo tradicional, que tem decisões, recomendações e intervenções simplificadas, válidas para grandes extensões de áreas a partir de diagnósticos médios. Este modelo tradicional porém, tem sido muito questionado, principalmente devido à necessidade de melhorar o gerenciamento dos fatores de produção e uso racional dos insumos. A AP já de início proporciona um maior detalhamento de informações pela maior intensidade amostral (MOLIN, 2001; PONTELLI, 2006).

A aplicação uniforme de insumos, tais como fertilizantes, corretivos e agroquímicos, pode resultar em excesso de aplicação sobre determinadas áreas da lavoura e falta em outras. Este desequilíbrio provoca diminuição da eficiência da fertilização bem como pode causar problemas de poluição de lençóis freáticos devido à lixiviação do fertilizante não utilizado pela cultura. Além disso, o uso excessivo de corretivos e fertilizantes pode fazer com que a planta absorva nutrientes acima de suas exigências, levando a uma limitação de produtividade pelo excesso do mesmo na planta (CHEN et al., 2004; Serra, 2008).

Para Motomiya et al. (2011), a utilização racional de insumos vai além do propósito de obter lucro ou evitar prejuízos, pois a aplicação de doses mais precisas de fertilizantes, permite que a planta tenha a sua disposição a quantidade de nutrientes que ela realmente necessita, sem excessos ou faltas, e que esta possa, então, expressar ao máximo seu potencial produtivo.

Num sistema de produção agropecuário sustentável, a qualidade do solo serve como alicerce, e o planejamento da propriedade deverá ser elaborado tendo como ponto fundamental as condições do substrato desse alicerce (REICHERT et al., 2003). Segundo Santi et al. (2009), a prática da AP no Brasil deverá estender-se, de forma integrada, à diversas áreas da produção, principalmente, aspectos relacionados ao

manejo e conservação de solos, como por exemplo, levar em consideração as variações de relevo do solo nos ambientes de produção, sua qualidade física (compactação, disponibilidade hídrica) e sua qualidade químico-biológica associada à manutenção ou incremento da matéria orgânica e práticas culturais vinculadas (controle de plantas daninhas, rotação de culturas, plantas de cobertura e formação de palhada).

Explorar os atributos físicos do solo permite analisar o ambiente onde as raízes se encontram e avaliar suas condições para absorver água e nutrientes. Esse fato é importante, pois para que um solo possa ser tido como produtivo, além de fértil, ou seja, possuir em quantidades suficientes e balanceadas todos os nutrientes essenciais às plantas, também deve lhes fornecer um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular com oxigênio suficiente para que a água e os próprios nutrientes possam ser absorvidos.

Toda a complexidade do sistema, exige que diversas áreas estejam intrinsecamente em conexão para o sucesso e funcionamento da AP. Sendo assim, o conhecimento da variabilidade química do solo é tão importante quanto da física do solo, e essenciais para obtenção de incrementos reais de produtividade nas culturas. Através da análise geoestatística e ajuste do semivariograma é possível caracterizar a dependência espacial das variáveis.

Diante do exposto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, assim como o comportamento da produtividade da soja e sua dependência espacial, utilizando-se como base a estatística descritiva e a geoestatística. Para determinar as correlações existentes entre as variáveis do solo e a produtividade da cultura da soja realizou-se a análise de correlação linear de Pearson.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agricultura de Precisão

Segundo Werner (2004), os conceitos fundamentais da Agricultura de Precisão (AP) foram concebidos nos Estados Unidos ainda na década de 1920. Apesar deste longo tempo, as primeiras iniciativas de pesquisa e adoção da AP no Brasil só ocorreram na segunda metade da década de 1990. Numa primeira fase, a AP era vista apenas como um conjunto de ferramentas para o manejo localizado da lavoura. Posteriormente, deu-se uma interpretação mais sistêmica, considerando-a como um sistema de gerenciamento da produção agrícola, dotado de técnicas voltadas à otimização do sistema de produção, tendo como elemento chave a gestão da variabilidade espacial da produção e dos fatores nela envolvidos (MOLIN, 2001).

A popularização dos equipamentos GPS (*“Global Positioning System”*) e o desenvolvimento de diversos equipamentos, dispositivos e programas computacionais voltados à obtenção e processamento de dados georeferenciados, tornaram suas aplicações na agricultura, cada vez mais comuns. Aliado à estes fatores, temos a disponibilização de colhedoras equipadas com GPS e sensores de produtividade em 2000, que impulsionou o mercado da AP (RESENDE et al., 2010).

Pierce e Nowak (1999) atentando-se aos princípios básicos, formularam a seguinte definição: *“Agricultura de Precisão é a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental”*.

Neste sentido, Molin (2004) salientou que a AP deve ser vista como uma estratégia de manejo do solo e das culturas, capaz de melhorar o nível de gerenciamento agrícola, oferecendo melhor suporte para a tomada de decisão. Isto só possível, porque a AP traz consigo a possibilidade de identificar, quantificar e mapear, com acurácia, a variabilidade das lavouras (SARAIVA et al., 2000).

O aumento da eficiência no gerenciamento da agricultura tem maximizado a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo (SILVA et al., 2008). Com isso, a AP vem destacando-se no setor agrícola nacional, como uma forma de tratamento localizado, baseada no manejo regionalizado da lavoura, gerando benefícios econômicos e/ou ambientais (QUEIROZ et al., 2000).

Segundo Silveira et al. (2000), mesmo em uma área considerada uniforme, segundo suas características visíveis de campo, tais como: topografia, cor do solo e vegetação, existe certa heterogeneidade dos atributos do solo.

Neste sentido, deve-se englobar todos os aspectos relacionados à produção, sejam eles inerentes aos solos, clima, diversidade de culturas, performance de máquinas agrícolas e insumos naturais (físicos, químicos e biológicos) ou sintéticos. Para tanto, algumas etapas devem ser seguidas: (i) identificação da variabilidade; (ii) caracterização da variabilidade; (iii) identificação dos principais fatores limitantes; (iv) desenvolvimento do plano de ação; (v) manejo da variabilidade; (vi) avaliação econômica e ambiental (COELHO, 2005).

O grande volume de dados resultantes da adoção das técnicas e conceitos de AP geram, a princípio, certas dúvidas sobre a interpretação dessas diversas informações. Pressupõe-se, então, a elaboração e utilização de mapas que descrevam as características de uma dada área. Através da geoestatística, as variações podem ser estudadas permitindo a interpolação dos dados. Com base nas informações contidas nesses mapas, são tomadas as decisões que envolvem o manejo regionalizado dessas áreas (CARVALHO et al., 2001; SILVA et al., 2003).

O mapa de produtividade, destaca-se como alternativa moderna para o gerenciamento da variabilidade espacial e temporal de lavouras comerciais, podendo ser um potencial recurso nas tomadas de decisão sobre o manejo do solo (MOLIN, 1997; MILANI et al., 2006). Segundo Lark et al. (1999), a análise de uma sequência de mapas de produtividade, associada à interpretação dos atributos do solo, é uma forma eficiente para definição de unidades de manejo. Para tanto, deve-se identificar o conjunto dos fatores mais importantes que influenciam as produtividades das culturas no campo.

Partindo da premissa de que a produção na agricultura não é uniforme e de que o substrato representado pelo solo tem elevada variabilidade espacial, é de se considerar como fundamental o desenvolvimento e utilização de formas de gerenciamento dos sistemas de produção agrícolas que incorporem esses fatores buscando a sua otimização (MOLIN, 2004).

Por fim, Rodrigues (2002) ressalta que é incorreto dizer que a meta da AP seja uniformizar a produtividade através de todo o campo, mas sim, perceber a produtividade potencial e a qualidade da cultura com o incremento do retorno econômico de todas as partes de um campo.

2.2. Variabilidade dos atributos do solo e da produção

Estudos realizados têm mostrado que a variabilidade do solo não é puramente aleatória, apresentando dependência espacial (VIEIRA et al., 1981; VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985); e que a variabilidade da cultura segue o mesmo comportamento (MILLER et al., 1988; BHATTI et al., 1991). Segundo Acock e Pachepsky (1997), a temperatura do ar, a radiação solar, a precipitação pluvial, a umidade, os ventos, os teores de nutrientes, a profundidade do solo, a densidade do solo, a presença de plantas daninhas, pragas e doenças são alguns dos fatores que afetam as culturas e podem causar variabilidade.

A heterogeneidade é uma característica intrínseca dos solos e sua variabilidade (espacial, horizontal e vertical) é dependente dos fatores de formação, podendo ser influenciada pelo tipo de manejo adotado. O cultivo resulta em alterações, aumentando ainda mais a variabilidade dos atributos do solo (SANTOS et al., 2006; SOUZA et al., 2007). Para Rosa Junior et al. (2004), as práticas de manejo podem provocar alterações em algumas características físicas e/ou químicas do solo.

De acordo com Dampney e Moore (1999), os principais fatores causadores da variabilidade na produção das culturas podem ser classificados em três categorias: (a) fatores fixos, difíceis de serem alterados (textura e profundidade do solo); (b) fatores persistentes, que podem ser alterados (atributos químicos e físicos do solo); (c) fatores sazonais, que são alterações em curto espaço de tempo (clima e incidência de pragas e doenças).

O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo regionalizado das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala (GREGO e VIEIRA, 2005).

O fato é que a fertilidade do solo não pode ser considerada como aleatória, porém sistemática em alguma extensão, como já era alertado por Le Clerg et al. (1962), demonstrando as preocupações para a explicação de determinadas variações. Trangmar et al. (1985) e Simões et al. (2006), em estudos com fatores de produção, ressaltaram que, dentre outros, os atributos físicos do solo influenciam diretamente o crescimento e desenvolvimento das culturas. Desta maneira, a avaliação da variabilidade espacial desses atributos é importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo que visam aumentar a produtividade agrícola.

2.3. Geoestatística e Krigagem

A estatística clássica assume que a variabilidade em torno dos valores médios é aleatória e independente da posição espacial, porém, estudos têm demonstrado que a variabilidade das propriedades do solo, dentro de certo domínio, pode ser expressa em função da distância de separação entre elas. A geoestatística então, constitui uma importante ferramenta na análise e na descrição da variabilidade das propriedades do solo (VIEIRA, 1981; TRANGMAR et al., 1985; GONÇALVES, 1997; FIETZ et al., 1999).

D. G. Krige, matemático sul-africano, em meados de 1951, foi quem desenvolveu as primeiras ferramentas e conceitos estatísticos denominados geoestatística. Em seus estudos na área de mineração, ele concluiu que a variância dos dados possuía uma estruturação que dependia da distância de amostragem. A partir desta constatação surgiram os conceitos básicos.

Fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas (TVR), espera-se que os valores medidos em um determinado local estejam, de alguma forma, em concordância com a sua distribuição espacial, sendo que, na média, as amostras mais próximas no tempo e espaço, devem ser mais semelhantes entre si do que aquelas tomadas a distâncias maiores. Para isto, a geoestatística teve como base os conceitos de função aleatória e estacionariedade de segunda ordem (MATHERON, 1963; ISAACS e SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA et al., 2002).

Considerado com um "medidor" da dependência espacial entre as amostras, através do qual é possível verificar e modelar a dependência espacial de uma variável, o ajuste de um modelo matemático teórico é um dos aspectos mais importante para a geoestatística, pois a partir de um semivariograma adequado torna-se possível a interpolação dos dados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (VIEIRA et al., 1983; VIEIRA, 2000).

Segundo Vieira (2000), para os estudos de variáveis de interesse agrônomo, tais como solo e planta, os principais modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais são: esférico, exponencial e gaussiano. Porém existem outros modelos como o linear e "holle effect".

A partir do ajuste de um modelo matemático aos dados, são definidos os seguintes parâmetros do semivariograma: a) efeito pepita (C_0): valor de γ quando $h = 0$; b) alcance da dependência espacial (a): distância a partir da qual a $\gamma(h)$ permanece

aproximadamente constante; e c) patamar (C_0+C): valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance, o qual se aproxima da variância dos dados (VIEIRA et al., 1981).

De acordo com Cambardella et al. (1994), a dependência espacial de uma variável pode ser classificada quanto ao seu grau, determinando quanto da variância espacial esta presente na total. Portanto, a partir da proporção do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C) pode-se calcular o grau de dependência espacial (GDE) que pode ser: forte ($GDE < 25\%$), moderada (GDE entre 26% e 75%) ou fraca ($GDE > 75\%$). Todavia, se a relação entre efeito pepita e patamar for igual a 100% , temos o semivariograma com efeito pepita puro, caracterizando independência espacial.

Contudo, medições localizadas em distâncias maiores que a estabelecida pelo alcance têm distribuição espacial aleatória e por isso podem ser consideradas independentes entre si. Neste caso, a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que o alcance são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados (SOUZA et al., 2001).

Embora existam diversos interpoladores, a Krigagem é a única que utiliza o semivariograma em sua modelagem. Ela é uma técnica usada na geoestatística para estimar valores em locais não amostrados, que resulta em valores não tendenciosos e com variância mínima. Neste método de interpolação, os pesos variam de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma, ou seja, uma média móvel ponderada. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas (VIEIRA, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

O experimento foi conduzido na Fazenda Princesa dos Campos, localizada no município de Maracaju - MS, cujas coordenadas geográficas são 21°46'20,3" S e 55°24'49,3" O. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho distroférico, de textura argilosa com valores médios de 590,0 g kg⁻¹ de argila, 290,0 g kg⁻¹ de areia e 120,0 g kg⁻¹ de silte. O clima local é classificado como Am (tropical monçônico) segundo a classificação de Köppen.

O sistema de manejo do solo utilizado na propriedade é o Sistema de Plantio Direto (SPD), adotado desde 1985, conciliado, a partir de 2006, com emprego de técnicas de Agricultura de Precisão para correção da fertilidade do solo em taxa variável.

3.2. Esquema experimental

A área experimental constituiu-se de um talhão de 24,8 ha com altitude média de 525 m e declividade média variando de 1 a 2%, onde estabeleceu-se uma grade com espaçamento regular de 70,0 m para amostragem sistemática, obtendo-se 51 pontos de amostragem (Figura 1).

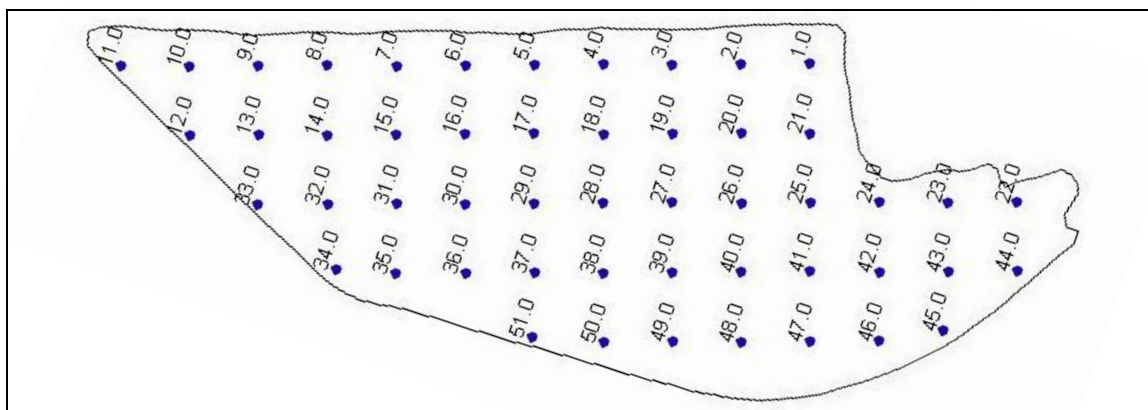


FIGURA 1. Detalhamento do polígono da área, especificando-se os pontos amostrais.

3.3. Amostragens e determinações

Avaliou-se atributos físicos e químicos do solo, assim como a produtividade da cultura da soja, cultivar BMX Potência RR, durante a safra 2011/12. Foram coletadas as amostras de solo entre 15 a 30 DAE, e dados de produtividade ao término do ciclo da cultura.

3.3.1. Atributos físicos do solo

a) Textura (areia, silte e argila): foram coletadas amostras deformadas na camada 0,0 a 0,20 m de profundidade. Utilizou-se o método da pipeta para determinação da composição granulométrica, conforme descrito por Camargo et al. (1986).

b) Densidade do solo (Ds), Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Volume Total de Poros (VTP): foram coletadas amostras indeformadas do solo em anéis volumétricos de 88,6 cm³ com altura de 0,05 m, na camada 0,0 a 0,20 m, totalizando 4 amostragens por ponto. Utilizou-se a metodologia descrita por Claessen (1997) para determinação de Ma, Mi e VTP. Após essas determinações, as amostras foram levadas à estufa a 105°C, por 48 h, para se determinar a Ds pelo método do anel volumétrico.

c) Estabilidade de agregados: foram coletadas amostras com estrutura preservada na forma de blocos (0,10 m x 0,10 m x 0,10 m) em trincheiras (0,40 m x 0,40 m x 0,40 m) nas camadas 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Após secas ao ar e processadas pelo método de agregação via seca, reservou-se o material retido na peneira de malha 4,63 mm. Em seguida, as amostras devidamente pesadas e pré-umedecidas, foram postas no aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de peneiras de 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro. Os valores de Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG) foram determinados de acordo com Kemper e Rosenau (1986).

d) Resistência à penetração (RP): dimensionada a partir do valor de índice cone, utilizando-se o medidor eletrônico penetrológ - PLG 1020 (Falker Automação Agrícola). A amostragem ocorreu entre 36 e 72 horas após uma precipitação de 73 mm, sendo realizadas 5 medições para cada ponto até a profundidade de 0,50 m, com intervalos de 0,05 m. Através de software dedicado (Compactação do solo v.1.30) calculou-se os valores médios de resistência à penetração para cada ponto amostral.

3.3.2. Atributos químicos do solo

As amostras para determinação dos atributos químicos do solo foram coletadas nas camadas 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, com auxílio de trado do tipo calador. Em cada ponto amostral foram coletadas cinco amostras simples para a composição de uma composta. Os atributos analisados foram: pH em CaCl₂, potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), de acordo com metodologia descrita por Claessen (1997). Para extração do P, K, Cu, Fe, Mn e Zn no solo foi empregado o extrator Mehlich I; Ca, Mg e Al foram extraídos utilizando-se KCl 1 mol L⁻¹. Após a análise química, foram

calculados os seguintes atributos de fertilidade do solo: capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB), saturações de potássio (K%), cálcio (Ca%), magnésio (Mg%) e alumínio (m%) e saturação por bases (V%).

3.3.3. Produtividade da cultura da soja

A produtividade da cultura da soja foi determinada por colheita mecanizada de grãos, utilizando-se a colheitadeira John Deere STS 9770 e seus sensores de produção. Utilizado o software SGIS, extraíram-se as produtividades médias de cada ponto das 51 células, conforme a malha amostral.

3.4. Análises estatísticas

3.4.1. Estatística descritiva

Foi realizada uma análise preliminar dos dados com o objetivo de estudar o comportamento da variável e determinar a presença de valores discrepantes. Os parâmetros estatísticos média, mediana, coeficiente de variação foram determinados com o objetivo de se verificar a existência de tendência central e dispersão dos dados. Realizou-se também teste "W" de Shapiro-Wilk para verificação da condição de normalidade. O programa utilizado para os cálculos foi o SigmaPlot 11.0.

3.4.2. Análise geoestatística

A análise da dependência espacial das variáveis foi realizada através do ajuste dos dados ao semivariograma experimental, de acordo com a Teoria das Variáveis Regionalizadas (TVR), utilizando-se o programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Sob o ajuste proposto pelo processo automático do programa GS+, aplicou-se o “método das aproximações sucessivas”, para ajuste dos semivariogramas teóricos aos experimentais, conforme descrito por Guerra (1988). Nesse método, o processo de ajuste finaliza, quando as discrepâncias entre os valores experimentais e teóricos forem mínimas.

3.4.3. Correlação

Para correlacionar a produtividade da soja com os atributos físicos e químicos do solo utilizou-se o índice de correlação linear de Pearson (nível de 5% de significância), calculado com auxílio do programa SigmaPlot 11.0.

3.5. Interpolação por krigagem e mapeamento

A técnica de interpolação dos dados utilizada para o mapeamento da variabilidade foi a krigagem. Com base no semivariograma ajustado, realizou-se os mapas utilizando o software SSToolbox (SST Development Group®), no qual, adotou-se a distância de 20m como tamanho de célula.

3.6. Determinação das classes de interpretação

Diante das dificuldades e limitações da análise isolada de cada atributo do solo na literatura, diversos trabalhos foram analisados para uma melhor adequação às condições locais. Após estudo detalhado, definiu-se as classes de interpretação e suas respectivas faixas limitante de produtividade, para os atributos químicos e físicos do solo, na cultura da soja (Quadros 1 e 2). Com relação à produtividade da soja determinou-se uma divisão em níveis: ruim (<3000 Kg), regular (3000 a 3200 Kg), bom (3200 a 3400 Kg), ótimo (3400 a 3600 Kg) e excelente (>3600 Kg); visando uma melhor interpretação e discussão dos resultados.

QUADRO 1. Classes de interpretação adotadas para os atributos físicos: Densidade do solo - Ds, Macroporosidade - Ma, Microporosidade - Mi, Volume Total de Poros - VTP, Diâmetro Médio Geométrico - DMG, Diâmetro Médio Ponderado - DMP e Resistência à Penetração - RP

ATRIBUTOS	CLASSES	FAIXAS	TRABALHOS CONSULTADOS
Ds (Mg m ⁻³)	Baixo	<1,4	Camargo e Alleoni (1997); Jones, (1983); Klein, (2002).
	Médio	1,4-1,55	
	Alto	>1,55	
Ma (m ³ m ⁻³)	Crítico	<0,05	Marschner, (1995); Stolzy, (1974); Suzuki, (2005).
	Intermediário	0,05-0,10	
	Adequado	>0,10	
Mi (m ³ m ⁻³)	Crítico	<0,26	Rodrigues et al (2008).
	Adequado	>0,26	
VTP (m ³ m ⁻³)	Crítico	<0,36	Rodrigues et al (2008); Novais et al. (2007).
	Intermediário	0,36-0,45	
	Adequado	>0,45	
DMG (mm)	Baixo	<1	Da Ros et al. (1997); Vasconcelos et al. (2010).
	Médio	1-2	
	Adequado	>2	
DMP (mm)	Baixo	<1	---
	Médio	1-2	
	Adequado	>2	
RP (KPa)	Tolerável	<2500	Classificação adaptada a partir da recomendação da Falker Automação Agrícola, de acordo com a classe textural.
	Intermediário	2500-3500	
	"Pré-crítico	3500-4000	
	Crítico	>4000	

QUADRO 2. Classes de interpretação adotadas para os atributos químicos: Acidez ativa - pH, Fósforo - P, Potássio - K, Cálcio - Ca, Magnésio - Mg, Alumínio - Al, Soma de Bases - SB, Capacidade de Troca Catiônica - CTC, Saturação por Bases - V%, Saturação de K - K%, Saturação de Ca - Ca%, Saturação de Mg - Mg%, Saturação de Al - m%, Zinco - Zn, Cobre - Cu, Manganês - Mn e Ferro - Fe

ATRIBUTOS	CLASSES	FAIXAS	TRABALHOS CONSULTADOS
pH em CaCl ₂	Baixo	≤4,9	Alvarez et al. (1999); Raij et al. (1996).
	Médio	5,0-5,5	
	Ideal/Adequado	5,6-6,5	
	Alto	>6,5	
P (mg dm ⁻³)	Muito baixo	≤3,0	Alvarez et al. (1999).
	Baixo	3,1-6,0	
	Médio	6,1-9,0	
	Bom	9,1-18,0	
K (cmol _c dm ⁻³)	Muito Bom	>18,0	Broch e Ranno (2008).
	Baixo	≤0,20	
	Médio	0,21-0,35	
	Alto	>0,35	
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Baixo	≤2,0	EMBRAPA (2006).
	Médio	2,1-4,0	
	Alto	>4,0	
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Baixo	≤0,40	EMBRAPA (2006).
	Médio	0,41-0,80	
	Alto	>0,80	
Al (cmol _c dm ⁻³)	Bom	≤0,30	EMBRAPA (2006).
	Médio	0,31-0,80	
	Ruim	>0,80	
SB (cmol _c dm ⁻³)	Baixo	≤1,80	Ribeiro et al. (1999).
	Médio	1,81-3,60	
	Bom	3,61-6,00	
	Muito bom	>6,00	
CTC (cmol _c dm ⁻³)	Baixo	≤7,2	Sousa e Lobato (2002).
	Médio	7,3-9,0	
	Bom	9,1-13,5	
	Muito bom	>13,5	
V% (%)	Baixo	≤3,5	Sousa e Lobato (2002)
	Médio	3,6-6,0	
	Bom	6,1-7,0	
	Muito bom	>7,1	
K% (%)	Baixo	<1	Lopes e Guidolin (1989); Sousa e Lobato (2002).
	Médio	1-2	
	Bom	2-3	
	Muito bom	>3	
Ca% (%)	Baixo	≤50	Lopes e Guidolin (1989).
	Médio	51-60	
	Alto	>60	

"...continua..."

"QUADRO 2, Cont."

ATRIBUTOS	CLASSES	FAIXAS	TRABALHOS CONSULTADOS
Mg% (%)	Baixo	≤ 10	Lopes e Guidolin (1989).
	Médio	11-20	
	Alto	> 20	
m% (%)	Bom	< 2	Raij et al. (1985).
	Médio	2-7	
	Ruim	> 7	
Zn (mg dm⁻³)	Baixo	$\leq 1,0$	Galvão (1998); Sousa e Lobato (2002).
	Médio	1,1-1,6	
	Alto	$> 1,6$	
Cu (mg dm⁻³)	Baixo	$\leq 0,4$	Galvão (1998); Sousa e Lobato (2002)
	Médio	0,5-0,8	
	Alto	$> 0,8$	
Mn (mg dm⁻³)	Baixo	$\leq 1,9$	Galvão (1998); Sousa e Lobato (2002).
	Médio	2,0-5,0	
	Alto	$> 5,0$	
Fe (mg dm⁻³)	Baixo	≤ 18	Ribeiro et al. (1999).
	Médio	19-30	
	Alto	31-45	
	Muito alto	> 45	

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produtividade da soja

Os resultados da análise descritiva para a produtividade da cultura de soja na safra 2011/12 encontram-se no Quadro 3. Observa-se que a cultura da soja apresentou valores de produtividade bastante satisfatórios, com média e mediana de 3539,20 kg ha⁻¹ e 3552,50 kg ha⁻¹, respectivamente. Apesar disto, verificou-se uma grande variação entre a produtividade mínima, de 3035,0 kg ha⁻¹ e máxima, de 4001,5 kg ha⁻¹, com amplitude de 966,5 kg ha⁻¹, o que representa, 16,1 sc ha⁻¹. Esta diferença porém, não resultou em um CV alto, mas sim baixo, com apenas 7,0%.

QUADRO 3. Resultados da estatística descritiva para produtividade de grãos da soja (kg ha⁻¹), safra 2011/12

Produtividade	Média	Mediana	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo	W	D.F.
Soja	3539,20	3552,50	7,0	3035,0	4001,5	0,977	Normal

CV = coeficiente de variação; W = coeficiente de Shapiro-Wilk; D.F. = distribuição de frequência.

Os valores próximos de média e mediana indicam que a produtividade têm distribuição simétrica, fato confirmado pelo teste W, que indica que os dados têm distribuição normal.

Para a análise geostatística utilizou-se o critério do menor valor da soma do quadrado dos resíduos (SQR), conforme Zimmerman e Zimmerman (1991). Esta técnica possibilita avaliar a dependência espacial da variável. Nesse caso, o semivariograma que melhor se ajustou à Produtividade da soja - Ps foi o modelo esférico (Figura 2).

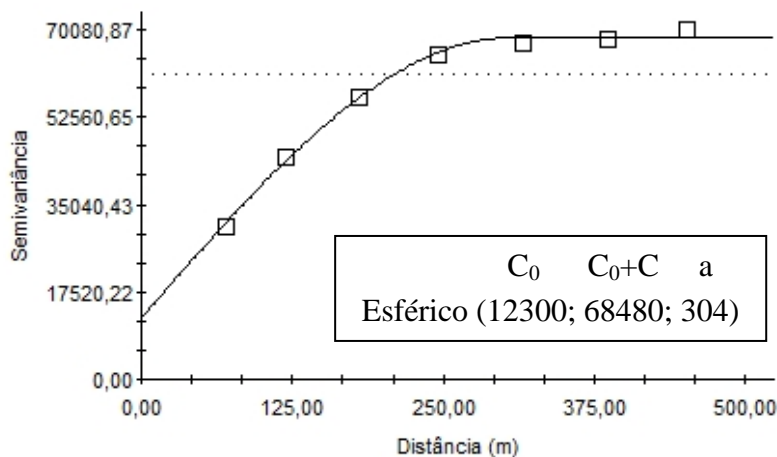


FIGURA 2. Semivariograma ajustado aos dados da Ps.

A variável apresentou forte dependência espacial, devido ao valor de 18% para GDE, conforme Cambardella et al. (1994). Segundo o autor, as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo.

Webster (1985) salientou a importância do alcance (a) para o planejamento e avaliação experimental, podendo auxiliar na definição de procedimentos amostrais. Definido como a distância máxima entre amostras na qual existe dependência espacial, o alcance talvez seja o parâmetro mais importante e de aplicação prática da análise geoestatística. Com esta informação pode-se definir a malha amostral mais adequada para cada atributo que se pretende estudar. Neste caso, obteve-se um alcance de 304,0 m indicando que uma amostragem de produtividade a cada 304,0 m seria suficiente para representá-la, ou seja, uma malha amostral com cerca de 9,2 ha.

Segundo Molin (2002), os mapas de produtividade são considerados como a alternativa mais completa para discriminar a variabilidade espacial das lavouras. Sendo assim, elaborou-se o mapa de distribuição espacial da produtividade da cultura (Figura 3), a partir dos parâmetros do semivariograma ajustado e a técnica de interpolação dos dados por krigagem. De maneira geral, observou-se uma maior produtividade da cultura na região central da área experimental.

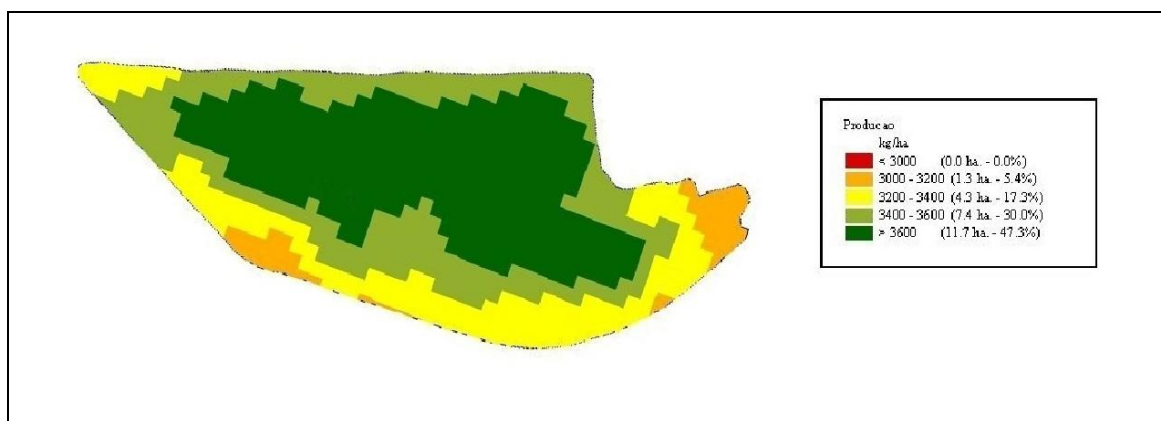


FIGURA 3. Mapa de produtividade da cultura da soja (safra 2011/12).

4.2. Atributos físicos do solo

4.2.1. Estatística descritiva

Analisando isoladamente os valores de média e mediana (Quadro 4) observa-se que, se fossem considerados apenas estes parâmetros para a caracterização, o solo poderia ser considerado excelente à produção, uma vez que, os atributos encontram-se em níveis adequados, com exceção do DMG (Diâmetro Médio Geométrico), nas duas profundidades estudadas, e do DMP (Diâmetro Médio Ponderado) na profundidade de 0,10 a 0,20 m.

A estabilidade de agregados, porém, não pode ser considerada restritiva à produção. Segundo diversos autores, ela serve como parâmetro qualitativo do solo, promovendo benefícios a partir de agregados de 2mm. Segundo Vasconcelos et al. (2010), a agregação controla os movimentos internos de água, ar e calor, interferindo consequentemente, no crescimento de raízes.

Através das medidas de dispersão (Quadro 4) dos atributos físicos é possível constatar que existe grande diferença entre os valores máximos e mínimos. Observou-se a presença de alguns pontos com índices restritivos à produção, como é o caso dos valores máximos de: Densidade do solo (D_s) desde a camada superficial até 0,20 m; Macroporosidade (Ma) a partir de 0,05 m até 0,20 m; e Resistência à Penetração (RP) da camada 0,05 m até 0,25 m. Valores baixos de DMG e DMP foram encontrados nas duas profundidades estudadas. Segundo Falleiro et al. (2003), a ausência de revolvimento do solo acarreta um acomodamento natural das partículas, evidenciado pelo maior valor de D_s , tanto em profundidade, como quando comparou com tipos de preparo do solo. O mesmo ocorre com a Ma , Volume Total de Poros (VTP) e RP . Com relação à Microporosidade (Mi), observou-se o comportamento inverso, aumentando em profundidade, em consequência da diminuição de Ma . Este comportamento também foi observado por Beutler e Centurion (2004), estudando o efeito da compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja.

Quanto ao CV (Quadro 4), observou-se valores baixos (<15%) para a maioria dos atributos físicos do solo, com exceção para os valores de Silte, Ma e DMG, em todas as profundidades estudadas, DMP na profundidade 0,10 a 0,20 m, e RP nas primeiras três profundidades estudadas, cujos valores de CV se enquadraram entre moderado ($15% < CV < 25%$) e alto ($> 25%$) (WILDING e DRESS, 1983).

QUADRO 4. Resultados da estatística descritiva para os atributos físicos do solo: Argila (g kg^{-1}), Areia (g kg^{-1}), Silte (g kg^{-1}), Densidade do solo - Ds (mg m^{-3}), Macroporosidade - Ma ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Microporosidade - Mi ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Volume Total de Poros - VTP ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Diâmetro Médio Geométrico - DMG (mm), Diâmetro Médio Ponderado - DMP (mm) e Resistência à Penetração - RP (KPa)

Atributo	Prof. (m)	Média	Mediana	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo	W	D.F
Argila	0,0-0,20	589,35	611,11	10,5	491,80	683,37	0,900	LN
Areia	0,0-0,20	289,49	299,66	11,5	210,94	342,81	0,929	LN
Silte	0,0-0,20	120,45	119,42	48,5	14,24	244,68	0,978	Normal
Ds	0,0-0,05	1,36	1,37	10,1	1,10	1,61	0,965	Normal
	0,05-0,10	1,51	1,53	9,2	1,19	1,73	0,936	LN
	0,10-0,15	1,54	1,54	5,6	1,31	1,71	0,965	Normal
	0,15-0,20	1,53	1,53	4,7	1,40	1,68	0,376	Normal
Ma	0,0-0,05	0,149	0,134	34,5	0,071	0,269	0,952	Normal
	0,05-0,10	0,111	0,101	45,6	0,044	0,257	0,902	LN
	0,10-0,15	0,084	0,077	36,9	0,038	0,181	0,907	LN
	0,15-0,20	0,070	0,067	28,9	0,043	0,128	0,934	LN
Mi	0,0-0,05	0,342	0,340	8,2	0,282	0,394	0,982	Normal
	0,05-0,10	0,354	0,357	6,3	0,292	0,390	0,39	LN
	0,10-0,15	0,365	0,364	4,9	0,309	0,402	0,977	Normal
	0,15-0,20	0,373	0,372	3,6	0,338	0,405	0,993	Normal
VTP	0,0-0,05	0,492	0,490	7,3	0,427	0,565	0,968	Normal
	0,05-0,10	0,464	0,462	7,5	0,411	0,554	0,921	LN
	0,10-0,15	0,448	0,446	4,6	0,410	0,490	0,948	Normal
	0,15-0,20	0,443	0,444	4,0	0,394	0,485	0,979	Normal
DMG	0,0-0,10	1,90	1,87	16,5	1,16	2,52	0,981	Normal
	0,10-0,20	1,18	1,14	25,4	0,65	1,83	0,967	Normal
DMP	0,0-0,10	2,41	2,40	7,6	1,89	2,73	0,969	Normal
	0,10-0,20	1,78	1,79	17,4	1,10	2,35	0,976	Normal
RP	0,0-0,05	969,68	896,22	37,4	418,50	1812,90	0,954	Normal
	0,05-0,10	2384,40	2228,76	22,5	1580,94	3686,20	0,942	LN
	0,10-0,15	2878,85	2800,26	17,5	2041,90	4036,50	0,970	Normal
	0,15-0,20	2951,61	2918,34	13,6	2217,60	4063,70	0,965	Normal
	0,20-0,25	2883,32	2858,04	9,4	2123,10	3519,54	0,986	Normal
	0,25-0,30	2641,46	2646,54	8,8	2078,10	3138,30	0,991	Normal
	0,30-0,35	2369,84	2310,84	8,7	1946,34	2996,64	0,944	LN
	0,35-0,40	2127,79	2095,56	7,5	1837,08	2591,10	0,960	Normal
	0,40-0,45	1972,40	1963,98	9,0	1581,12	2764,44	0,874	LN
0,45-0,50	1832,82	1791,72	9,9	1518,30	2274,28	0,940	LN	

Prof. = profundidade; CV = coeficiente de variação; W = coeficiente de Shapiro-Wilk; D.F. = distribuição de frequência; LN = lognormal.

Segundo Nogueira (2007), um coeficiente de variação maior que 35% revela que a série é heterogênea e a média tem pouco significado; se for superior a 65%, a série é muito heterogênea e a média não tem significado algum. Porém, se for menor que 35% a série é homogênea e a média tem significado, podendo ser utilizada como representativa da série de onde foi obtida. Desta forma, pode-se dizer que o Silte, na profundidade de 0,0 a 0,20 m, a Ma nas profundidades de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,15 m, e a RP na profundidade de 0,0 a 0,05 m, apresentaram uma série de dados heterogêneos e a média tem pouco significado.

De modo geral, houve uma tendência de diminuição de todos os valores de CV, conforme se aumentou a profundidade analisada. Isso vem corroborar com resultados de diversos estudos que mostraram que os atributos do solo podem ser influenciados pelo tipo de manejo adotado, interferindo na estrutura e na variabilidade natural do solo (SOUZA et al., 2001; SANTOS et al. 2006; CAVALCANTE et al., 2011; SPERA et al., 2011).

Beutler (2003) verificou que em SPD, o acentuado tráfego de máquinas e equipamentos pesados sobre o solo provocou compactação superficial até a profundidade de 0,15 a 0,20 m. O fato é comprovado pela baixa variação dos atributos físicos em maiores profundidades, como nos dados deste experimento. Situação observada particularmente para a RP que aumentou gradativamente até a profundidade de 0,20 m e, posteriormente, decresceu até a profundidade máxima estudada.

Medida por penetrômetros, a resistência à penetração é a pressão sobre a área de um cone com ângulo sólido de 30° e este índice é regulamentado pela norma ASAE S.313.3, podendo ser considerado um bom indicador da compactação quando corretamente utilizado. Este valor, denominado índice de cone, representa a resistência mecânica do solo à penetração de um elemento normalizado (ponta cônica).

Tomando como base a tabela da Falker, para interpretação da RP medida pelo penetroLOG, PLG 1020, em solos pesados, foi possível observar valores com nível crítico à produção. São valores maiores que 4000 KPa em alguns pontos, indicando que ocorrerão perdas de produtividade por compactação nestes locais, pois são restritivos ao crescimento radicular. Segundo a classificação adotada, a faixa tolerável ao desenvolvimento normal seria até 2500 KPa, onde não existe perda de produtividade por este fator. Já no nível intermediário, existe potencial para perdas de produtividade, mas esta dependerá da associação com outros fatores. Atuante como lubrificante, o

conteúdo de água no solo é o principal amenizador da resistência mecânica do solo ao desenvolvimento radicular em profundidade.

De modo geral, os valores médios dos índices de D_s , Ma , Mi , VTP , DMG e DMP tenderam a tornar-se mais restritivos ao desenvolvimento das culturas quando comparou-se a camada superficial de 0,0 a 0,05 m com a subsuperficial de 0,15 a 0,20 m. Observou-se um aumento de 12,5% na D_s , tornando mais restritivo o desenvolvimento radicular; diminuição de 46,7% no espaço poroso de aeração - Ma , dificultando a troca de gases e infiltração de água no solo; aumento de 9% na porosidade de armazenamento de água - Mi , tornando a água disponível retida a tensões maiores, resultando na diminuição do espaço poroso total observado pela queda no VTP . A causa mais provável, talvez seja a baixa concentração de Matéria Orgânica (MO) no solo em profundidade, evidenciada pela diminuição dos índices de DMG e DMP na camada subsuperficial. Todos esses eventos reforçam a ideia do aumento de compactação em profundidade, concordando com os dados de Beutler e Centurion (2004). O aumento dos fatores restritivos em profundidade também foram observados por Fonseca et al. (2007).

O teor de MO é um importante atributo que influi diretamente sobre os indicadores físicos, principalmente sobre a agregação do solo. Ela atua para formar e estabilizar agregados nos diversos níveis hierárquicos e os agregados atuam no sentido de proteger fisicamente a matéria orgânica por oclusão, podendo ser considerados interdependentes (REEVES, 1997; SANTOS et al., 2008). Além disso, quando os valores do DMG atingem 2 mm ou mais, empiricamente a redução da erosão é significativa e esse valor pode ser considerado crítico, sendo tanto melhor quanto maior for o valor (VASCONCELOS et al., 2010). De acordo com Azevedo e Bonumá (2004), agregados são os aglomerados de partículas desde o tamanho da argila (iguais ou menores de 2 micrômetros) até maiores que areia (maiores que 2000 micrômetros).

A textura, parte mineral do solo, resultante do intemperismo do material de origem do solo, é considerada uma das características físicas mais estáveis (LIER, 2010). Apesar disto, foi possível observar grande variação deste atributo no solo estudado.

A fração granulométrica da argila corresponde às partículas mais importantes, pois estão associadas a fenômenos relacionados com a capacidade de armazenamento de água do solo, além de responder pela capacidade de retenção e troca de íons (LIER, 2010).

Utilizando o teste W (Shapiro-Wilk) a 5% de probabilidade (Quadro 4), buscou-se verificar a suposição de normalidade do conjunto de dados. Verificou-se então que a maior parte dos atributos físicos do solo apresentaram distribuição normal em alguma profundidade estudada. Os demais, assim como a Argila e a Areia, apresentaram distribuição do tipo lognormal.

4.2.2. Análise geoestatística

Nem todos os atributos físicos estudados apresentaram ajuste a um modelo matemático teórico (Quadro 5). Isto infere dizer, que a grade amostral utilizada não foi suficiente para identificar a estrutura da variabilidade. Neste caso, a distribuição espacial comporta-se de maneira aleatória e as amostras são independentes entre si para a malha estudada, ou seja, existe capacidade infinita de dispersão do atributo na área.

A ausência de dependência espacial, verificada pelo efeito pepita puro (epp) na distância de amostragem adotada, foi observada para os seguintes atributos: Ds, Ma e VTP na camada 0,0 a 0,05 m; DMG e DMP na camada 0,10 a 0,20 m; e RP nas profundidades de 0,20 até 0,50 m. Este comportamento, por sua vez, indica a necessidade de uma grade de amostragem mais adensada, a fim de que a dependência espacial possa ser detectada. Já os demais atributos analisados apresentaram ajuste aos modelos esférico ou exponencial.

Segundo Vieira (2000), a variabilidade não explicada que pode ser devida a erros de medida e microvariações não detectadas é representada pelo efeito pepita (C_0), considerando-se a distância de amostragem utilizada para a análise geoestatística. Quanto maior for o efeito pepita, maior será a descontinuidade entre as amostras. Analisando a amplitude de variação de C_0 (Quadro 5), pode-se dizer que os atributos Ds, Ma, Mi, VTP, DMG e DMP apresentaram boa continuidade da estrutura espacial, com valores entre 0,0 a 0,058. Quanto aos demais atributos verificou-se valores altos.

Quando comparados os resultados de um mesmo atributo nas diversas profundidades estudadas, observou-se um aumento gradativo do alcance (Quadro 5). Definido como o raio máximo no qual amostras vizinhas são relacionadas espacialmente (VIEIRA, 2000), este parâmetro apresentou comportamento inverso ao CV, ou seja, menor variabilidade em profundidade (Quadro 5) e, talvez, este seja o motivo dos melhores ajustes.

QUADRO 5. Resultados da geoestatística para os atributos físicos do solo: Argila (g kg^{-1}), Areia (g kg^{-1}), Silte (g kg^{-1}), Densidade do solo - Ds (mg m^{-3}), Macroporosidade - Ma ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Microporosidade - Mi ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Volume Total de Poros - VTP ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Diâmetro Médio Geométrico - DMG (mm), Diâmetro Médio Ponderado - DMP (mm) e Resistência à Penetração - RP (KPa)

Atributo	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a	r ²	SQR	GDE (%)
Argila	0,0-0,20	esf.	680,0	4033,0	184,0	0,78	6,06E+05	16,9
Areia	0,0-0,20	esf.	156,0	1245,0	252,0	0,82	9,39E+04	12,5
Silte	0,0-0,20	esf.	480,0	3534,0	167,0	0,73	5,63E+05	13,6
Ds	0,0-0,05	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,05-0,10	esf.	0,02	0,020	138,0	0,41	6,74E-07	11,8
	0,10-0,15	exp.	0,02	0,08	219,0	0,49	2,93E-06	23,9
	0,15-0,20	esf.	0,03	0,06	408,0	0,99	4,22E-08	47,4
Ma	0,0-0,05	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,05-0,10	esf.	0,0	0,0026	158,0	0,34	3,78E-06	0
	0,10-0,15	esf.	0,0	0,0010	187,0	0,41	5,51E-07	0
	0,15-0,20	esf.	0,00005	0,0004	131,0	0,36	3,63E-08	12,5
Mi	0,0-0,05	exp.	0,0006	0,0011	1419,0	0,85	1,06E-08	54,5
	0,05-0,10	esf.	0,0	0,0005	155,0	0,43	9,15E-08	0
	0,10-0,15	esf.	0,0	0,0003	180,0	0,59	2,43E-08	0
	0,15-0,20	exp.	0,0	0,0002	342,0	0,77	4,09E-09	0
VTP	0,0-0,05	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,05-0,10	esf.	0,00005	0,0012	128,0	0,32	3,97E-07	4,2
	0,10-0,15	esf.	0,00005	0,0004	179,0	0,38	7,84E-08	12,5
	0,15-0,20	esf.	0,00001	0,0003	144,0	0,42	2,67E-08	3,3
DMG	0,0-0,10	esf.	0,058	0,123	418,0	0,72	9,33E-04	47,2
	0,10-0,20	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
DMP	0,0-0,10	exp.	0,022	0,052	1176,0	0,75	8,21E-05	42,3
	0,10-0,20	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
RP	0,0-0,05	exp.	100,0	167200,0	486,0	0,80	2,16E+09	0,06
	0,05-0,10	exp.	39000,0	393900,0	684,0	0,77	1,23E+10	9,9
	0,10-0,15	exp.	1000,0	413000,0	912,0	0,85	1,00E+10	0,2
	0,15-0,20	exp.	27400,0	229200,0	714,0	0,91	1,36E+09	12,0
	0,20-0,25	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,25-0,30	exp.	29210,0	58430,0	462,0	0,61	1,48E+08	50,0
	0,30-0,35	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,35-0,40	exp.	7370,0	26490,0	207,0	0,71	2,01E+07	27,8
	0,40-0,45	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,45-0,50	e.p.p.	---	---	---	---	---	---

Prof. = profundidade; C₀ = efeito pepita; C₀+C = patamar; a = alcance; r² = coeficiente de determinação; SQR = soma do quadrado dos resíduos; GDE = grau de dependência espacial; e.p.p. = efeito pepita puro; esf. = esférico; exp. = exponencial.

Cavalcante et al. (2011), comparando diversos sistemas de manejo, verificaram que o plantio direto provoca maior estabilização dos atributos do solo, tornando-o mais homogêneo, como verificado no solo do estudo. Observa-se que as camadas superficiais apresentam maior variabilidade, do que as camadas subsuperficiais, que tendem a ser mais homogêneas.

De modo geral, obteve-se alcances variando de 128,0 m (VTP) até 1176,0 m (DMP), nas profundidades de 0,10 a 0,15 m e 0,10 a 0,20 m, respectivamente (Quadro 5). Valores de alcance similares foram encontrados por Cavalcante et al. (2011). Valores menores de alcance foram encontrados por Lima et al. (2007). Rabah e Almeida Gabriel (2009), porém, obtiveram valores de alcance bastante superiores.

Como o intervalo de amostragem deve ser igual ao alcance de dependência espacial possibilitando maior representatividade e posterior elaboração do mapa sobre toda a área, conforme Souza et al. (1997), pode-se inferir grades amostras variando de 1,6 ha, para VTP na profundidade de 0,10 a 0,15 m, até 138,5 ha, para DMP na profundidade de 0,10 a 0,20 m.

Com referência ao GDE, proposto por Cambardella et al. (1994), foi observado que quando presente, a dependência espacial dos atributos físicos apresentaram-se de moderada ($26\% < GDE < 75\%$) a forte ($GDE < 25\%$) (Quadro 5). Resultados similares foram observados por Cavalcante et al. (2011), evidenciando a importância do conhecimento da estrutura de dependência espacial para a implantação da AP.

4.3. Atributos químicos do solo

4.3.1. Estatística descritiva

Analisando os valores da média e mediana (Quadro 6), observou-se que com exceção do pH e saturação de alumínio (%m), na profundidade de 0,10 a 0,20 m, todos os demais atributos químicos - fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de cálcio (Ca%), saturação de magnésio (Mg%), saturação de potássio (K%), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn) e ferro (Fe) - estão presentes no solo em níveis adequados à produção agrícola, segundo a classe de interpretação utilizada.

Analisados os valores mínimo e máximo (Quadro 6) porém, observou-se a existência de locais com teores considerados limitantes ou insuficientes à expressão da máxima capacidade produtiva da cultura da soja, como é o caso do pH, Al, CTC, Ca%, Mg%, m% e Fe, na profundidade de 0,10 a 0,20 m. Tomando como base as regras da química agrícola, é possível inferir que o pH seria o fator agravante neste caso, pois todos os outros atributos químicos são dependentes do mesmo. Possivelmente, a acidez do solo está afetando a disponibilidade dos elementos que encontram-se em níveis ideais no solo. Neste momento, porém, a calagem não seria uma prática ideal, pois no SPD a correção da acidez limita-se a camada superficial, onde a V% está relativamente alta. Já a gessagem, sim, poderia amenizar o problema, diminuindo a saturação por alumínio e aumentando os teores de cálcio e enxofre.

Conforme classificação de Wilding e Dress, (1983), observou-se que a maioria dos atributos estudados apresentam CV de moderado ($15\% < CV < 25\%$) a alto ($> 25\%$), exceto o pH, CTC, V%, e Ca%, com valores entre 5,3% e 15,3% (Quadro 6). Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2008) e Trevisan et al. (2008). A amplitude dos dados indica a grande variabilidade dos atributos nas diferentes profundidades estudadas.

O acúmulo de P na superfície do solo, tem sido frequente nos sistemas que apresentam reduzido revolvimento do solo e acaba sendo decorrente da decomposição dos resíduos de plantas e a aplicação superficial de fertilizantes fosfatados. Desta forma acaba existindo maior concentração de P disponível na camada superficial com redução acentuada a medida que aumenta a profundidade. Este fato pode ser observado para os principais nutrientes do solo.

QUADRO 6. Resultados da estatística descritiva para os atributos químicos do solo: pH em CaCl_2 , P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por bases - V% (%), Saturação de Cálcio - Ca% (%), Saturação de Magnésio - Mg% (%), Saturação de Potássio - K% (%), Saturação de Alumínio - m% (%), Zn (mg dm^{-3}), Cu (mg dm^{-3}), Mn (mg dm^{-3}) e Fe (mg dm^{-3})

Atributo	Prof. (m)	Média	Mediana	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo	W	D.F
pH	0,0-0,10	5,51	5,52	5,3	5,05	6,08	0,959	Normal
	0,10-0,20	4,80	4,69	6,7	4,30	5,53	0,935	LN
P	0,0-0,10	69,39	66,08	24,9	39,24	113,60	0,960	Normal
	0,10-0,20	25,91	21,94	55,2	9,11	67,01	0,876	LN
K	0,0-0,10	0,80	0,78	13,7	0,53	1,01	0,973	Normal
	0,10-0,20	0,55	0,56	22,3	0,33	0,84	0,964	Normal
Ca	0,0-0,10	6,98	6,96	16,1	4,29	9,49	0,988	Normal
	0,10-0,20	4,68	4,70	26,8	2,29	7,06	0,976	Normal
Mg	0,0-0,10	1,46	1,41	22,8	0,90	2,16	0,952	Normal
	0,10-0,20	1,01	0,90	38,1	0,50	2,01	0,906	LN
Al	0,0-0,10	0,05	0,00	164,1	0,0	0,36	0,646	LN
	0,10-0,20	0,49	0,36	83,9	0,0	1,80	0,912	LN
SB	0,0-0,10	9,17	9,22	16,4	5,35	11,73	0,975	Normal
	0,10-0,20	6,13	6,20	24,7	3,24	8,89	0,970	Normal
CTC	0,0-0,10	10,91	10,90	12,3	7,65	13,06	0,957	Normal
	0,10-0,20	8,16	8,06	15,3	5,39	10,51	0,983	Normal
V%	0,0-0,10	83,96	85,09	4,7	74,31	89,77	0,942	LN
	0,10-0,20	74,10	74,24	10,9	52,74	86,39	0,948	Normal
Ca%	0,0-0,10	62,67	62,87	5,9	54,76	70,18	0,965	Normal
	0,10-0,20	56,84	58,16	12,0	40,55	67,53	0,951	Normal
Mg%	0,0-0,10	13,62	13,11	18,4	10,15	18,94	0,938	LN
	0,10-0,20	12,01	11,48	23,1	8,03	17,45	0,936	LN
K%	0,0-0,10	7,26	7,15	15,5	4,52	9,85	0,986	Normal
	0,10-0,20	6,84	6,83	18,2	4,58	9,88	0,974	Normal
m%	0,0-0,10	0,65	0,00	168,1	0,0	5,09	0,645	LN
	0,10-0,20	7,79	5,45	89,2	0,0	26,83	0,901	LN
Zn	0,0-0,10	17,78	17,68	33,3	5,92	30,47	0,986	Normal
	0,10-0,20	10,04	9,44	42,8	3,64	20,79	0,948	Normal
Cu	0,0-0,10	5,44	5,30	22,6	3,49	8,94	0,956	Normal
	0,10-0,20	6,22	6,30	20,2	2,57	8,62	0,951	Normal
Mn	0,0-0,10	45,40	44,60	25,4	28,97	77,44	0,956	Normal
	0,10-0,20	24,44	22,87	39,6	8,93	45,94	0,965	Normal
Fe	0,0-0,10	23,35	22,84	20,5	15,28	35,75	0,947	Normal
	0,10-0,20	35,19	35,82	25,8	16,10	52,51	0,969	Normal

Prof. = profundidade; CV = coeficiente de variação; W = coeficiente de Shapiro-Wilk; D.F. = distribuição de frequência; LN = lognormal.

Os altos valores de CV para o P (24,9% e 55,2%) são normalmente encontrados em diversos trabalhos, como de Zanão Júnior et al. (2010), e justificado, segundo o autor, pela dificuldade na adubação fosfatada que sofre interferências de vários fatores, inclusive pelo teor de argila.

Segundo Falleiro et al. (2003), a diminuição dos teores de Al na camada superficial do solo sob SPD, inclusive com níveis inferiores a outros tipos de preparo de solo em que emprega-se revolvimento do solo, tem sido frequentemente observado, em consequência das altas concentrações de calcário aplicados em superfície e sem incorporação. Quando analisado em profundidade, porém, observa-se o inverso, comprovando a baixa translocação do calcário. O mesmo tem sido observado com relação a saturação de alumínio.

Valores altos de CV para saturação de alumínio também foram encontrados por Dalchiavon et al. (2012). De acordo com Zanão Júnior et al. (2007), a redução da m% na superfície do solo em SPD pode estar relacionada à complexação orgânica do alumínio trocável por compostos solúveis presentes nos restos vegetais mantidos na superfície do solo.

O fato é que a variabilidade dos atributos químicos do solo aumenta com a adoção do sistema semeadura direta, quer no sentido horizontal, pela distribuição irregular na superfície do solo (KLEPKER e ANGHINONI, 1995; COUTO, 1997), quer ainda no sentido vertical, pelas diferenças nos teores de uma camada mais superficial em relação à outra mais profunda (ELTZ et al., 1989; AMARAL e ANGHINONI, 2001). A solubilidade e mobilidade dos nutrientes é outro fator que tem influência direta no processo de transporte e distribuição dos elementos químicos no solo.

Observou-se grande concentração de nutrientes na camada superficial em relação à subsuperficial, evidenciando a baixa translocação dos nutrientes distribuídos sobre o solo (à lanço). Porém, para os micronutrientes Cu e Fe, houve maiores concentrações na profundidade de 0,10 a 0,20 m, com acréscimos de 14,3% e 50,7% (Quadro 6). Bataglia et al. (2004), estudando a diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS, afirmaram que o levantamento dos teores de Cu, Mn e Fe são comumente problemáticos em função de contaminação externa, pois o Cu e o Mn são geralmente empregados em defensivos agrícolas, enquanto o Fe está relacionado aos tipos de solos ricos em óxidos de ferro. De modo geral, os teores médios dos demais nutrientes apresentaram decréscimos da ordem de 30,8% para o Mg até 62,6% para o P, quando comparado a primeira com a segunda profundidade estudada.

Segundo Falleiro et al. (2003), a ausência de revolvimento e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo em SPD, contribuem para o aumento dos teores dos elementos principalmente na superfície.

Com base no teste W (Shapiro-Wilk) a 5% de probabilidade, verificou-se que os atributos pH, P, K, Ca, Mg, SB, CTC, V%, Ca%, K%, Zn, Cu, Mn e Fe apresentaram distribuição normal em pelo menos uma das duas profundidades. Os atributos Al, m% e Mg%, porém, apresentaram distribuição do tipo lognormal (Quadro 6).

4.3.2. Análise geoestatística

Nem todos as variáveis estudadas apresentaram ajuste a um modelo matemático teórico dentro da grade amostral adotada (Quadro 7), caracterizando efeito pepita puro (epp), como foi o caso do P, Ca, SB, CTC, V%, Zn, Cu e Fe na profundidade de 0,0 a 0,10 m, além de Mg e Al na profundidade de 0,10 a 0,20 m. As demais variáveis ajustaram-se aos modelos esférico ou exponencial.

A ausência de dependência espacial apresentada por alguns atributos indica que esta variável possui distribuição espacial aleatória para a grade amostral utilizada. O fato é que o espaçamento de amostragem não foi suficiente para identificar a estrutura de variabilidade destes atributos. O aumento do número de pontos, através do adensamento de amostragem, poderia ter detectado a ocorrência de dependência espacial.

Analisando os valores de efeito pepita (C_0) (Quadro 7), definido por Vieira (2000) como sendo a variabilidade não explicada, que pode ser devida a erros de medida e microvariações não detectadas, observa-se que a maioria dos atributos apresentaram baixo C_0 , com variação de 0,0 para Al à 0,621 para Cu, evidenciando boa continuidade da estrutura espacial. Já os elementos P, Mn e Fe apresentaram altos valores, nas camadas de 0,10 a 0,20 m, 0,0 a 0,10 m, e 0,10 a 0,20 m, respectivamente. Desta forma, considera-se que quanto maior for o C_0 , maior será a descontinuidade entre as amostras. Esses resultados mostram que houve tendência dos atributos pouco móveis no solo apresentarem maior C_0 do que os mais móveis.

Quanto ao grau de dependência espacial (GDE), proposto por Cambardella et al. (1994), observou-se que, com exceção dos elementos Cu na profundidade de 0,10 a 0,20 m e do Mn na profundidade de 0,0 a 0,10 m, todos os outros atributos químicos, apresentaram dependência espacial forte ($GDE < 25\%$) (Quadro 7). Resultados similares

foram encontrados por Silva et al. (2003), Silva et al. (2007), Zanão Junior et al. (2007) e Dalchiavon et al. (2012), o que destaca a importância do conhecimento da estrutura de dependência espacial.

QUADRO 7. Resultados da geoestatística para os atributos químicos do solo: pH em CaCl_2 , P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), V% (%), Zn (mg dm^{-3}), Cu (mg dm^{-3}), Mn (mg dm^{-3}) e Fe (mg dm^{-3})

Atributo	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C	a	r^2	SQR	GDE (%)
PH	0,0-0,10	exp.	0,017	0,087	144,0	0,37	4,30E-04	19,5
	0,10-0,20	exp.	0,024	0,108	240,0	0,34	1,85E-03	22,6
P	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	24,300	208,200	113,0	0,31	7020,0	11,7
K	0,0-0,10	exp.	0,03	0,012	150,0	0,47	6,15E-06	22,4
	0,10-0,20	esf.	0,02	0,015	127,0	0,37	3,97E-05	12,9
Ca	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	0,01	1,561	150,0	0,55	4,00E-01	0,1
Mg	0,0-0,10	esf.	0,014	0,108	130,0	0,37	2,26E-03	12,9
	0,10-0,20	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
Al	0,0-0,10	esf.	0,00	0,07	151,0	0,66	4,91E-06	0,1
	0,10-0,20	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
SB	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	exp.	0,516	2,432	324,0	0,53	9,07E-01	21,2
CTC	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	0,01	1,494	151,0	0,61	2,59E-01	0,1
V%	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	0,100	68,700	142,0	0,44	1177,00	0,1
Zn	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	0,010	18,800	154,0	0,47	100,0	0,1
Cu	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	0,621	1,880	293,0	0,84	1,07E-01	33,0
Mn	0,0-0,10	exp.	39,900	150,900	378,0	0,69	1482,00	26,4
	0,10-0,20	esf.	0,100	93,080	155,0	0,77	486	0,1
Fe	0,0-0,10	e.p.p.	---	---	---	---	---	---
	0,10-0,20	esf.	11,800	86,260	165,0	0,66	623,00	13,7

Prof. = profundidade; C_0 = efeito pepita; C_0+C = patamar; a = alcance; r^2 = coeficiente de determinação; SQR = soma do quadrado dos resíduos; GDE = grau de dependência espacial; e.p.p. = efeito pepita puro; esf. = esférico; exp. = exponencial.

O alcance (a) (Quadro 7), definido por Trangmar et al. (1985) como o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para interpolação por krigagem, variou de 113,0 m (P na camada superficial) a 378,0 m (Mn na camada de 0,10 a 0,20

m). Estes valores são muito importantes para a definição de uma malha amostral. Considerando os valores de alcance das variáveis do solo citadas acima, observa-se que teríamos grades amostrais desde 1,2 ha até 14,3 ha, respectivamente, facilitando a amostragem sistemática para áreas com as mesmas condições de solo e uso agrícola, sem considerar os benefícios com economia de tempo e custos. Este dado é uma importante informação para redução do esforço de amostragem.

Conforme destacado por Corá et al. (2004), o fato de não ocorrer repetição dos mesmos valores de alcance para ambas as profundidades de solo analisadas, denota além da variabilidade vertical, variabilidade horizontal entre as profundidades.

4.4. Correlação entre atributos do solo e produtividade da soja

Visto a grande variabilidade espacial da produtividade da cultura da soja, assim como dos atributos físicos e químicas do solo, buscou-se através da análise de Correlação Linear de Pearson, avaliar se alguma das variáveis apresentaram correlação com a produtividade da soja (Ps). Para tanto, adotou-se um nível de significância de 5% e valor de correlação linear (p) mínimo de 0,3, isto porque estatisticamente, valores menores que 0,3 indicam baixo grau de linearidade entre as duas variáveis, e indiretamente, uma baixa covariância.

Dentre os diversos atributos do solo analisados em diferentes profundidades, apenas 6 variáveis apresentaram correlação linear significativa, sendo os pares: Ps x Areia e Ps x Silte na profundidade de 0,0 a 0,05 m, e Ps x RP nas profundidades de 0,0 a 0,05 m, 0,05 a 0,10 m, 0,10 a 0,15 m e 0,15 a 0,20; sendo esses, seus respectivos coeficientes de correlação: +0,312, -0,376, -0,602, -0,539, -0,420 e -0,313.

Pode-se observar então, que nenhum dos atributos químicos analisados, apresentaram correlação significativa com a produtividade da soja, assim como alguns nem todos os atributos físicos. No entanto, apenas o par significativo Ps x Areia apresentou correlação positiva, sendo para os demais, observado correlação negativa.

Resultados diferentes foram encontrados por Souza et al. (2008), que encontraram resultados significativos para os atributos químicos do solo. Diferentemente do que foi observado neste trabalho, normalmente encontram-se, na literatura, relatos de correlações significativas para os atributos químicos do solo.

Molin et al. (2002), porém, realizando um trabalho de mapeamento de produtividade de café e sua correlação com os componentes de fertilidade do solo, observaram que os componentes de correlação entre a produtividade e fertilidade do solo resultaram em baixos valores. Segundo o autor, talvez pela grande variação na produtividade (1,3 a 4,5 Mg ha⁻¹).

Carvalho et al. (2006), por sua vez, estudando a correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto, não conseguiram detectar correlação significativa entre a resistência à penetração e a produtividade.

De qualquer forma, são poucos os trabalhos na literatura que buscam analisar a correlação de atributos físicos do solo e a produtividade das culturas, principalmente aqueles voltados ao estudo do ambiente físico do solo sob a ótica da AP

e o SPD. Assim, pode-se considerar que o estudo da correlação dos atributos físicos é um fato novo na AP.

Evidencia-se neste trabalho então, que o fator restritivo à produção e mais significativo da sua variabilidade, seria a compactação do solo, mais especificamente a RP detectada pelo penetrômetro. Pode-se dizer que a resistência à penetração foi mais eficiente do que a densidade do solo e os outros parâmetros estudados para a identificação dos estados de compactação e as camadas compactadas, comuns em Latossolos muito argiloso com Sistema de Plantio Direto, e que interferem na produtividade das culturas.

Analisando os coeficientes de correlação significativos, através do p^2 , podemos inferir que 9,7% e 14,1% da variância da produtividade pode ser explicada pela variância da Areia e Silte, respectivamente. Quanto à RP, observa-se que 36,2%, 29,1%, 17,6% e 9,8% da variância da produtividade pode ser explicada por sua variância, respectivamente, nas profundidades de 0,0 a 0,05 m, 0,05 a 0,10 m, 0,10 a 0,15 m, 0,15 a 0,20 m.

Este resultado revela a importância dos primeiros 0,20 m para o desenvolvimento normal das raízes e para a produtividade da cultura da soja. Diversos autores observaram que justamente esta é a faixa em que se concentram a maior parte das raízes, chegando a ter cerca de 85% das raízes concentradas na profundidade de 0,0 a 0,10 m.

Neste caso, as discrepâncias encontradas entre as variabilidades dos atributos químicos do solo e da produtividade, sendo que esta última apresenta-se mais homogênea, sugere que os fatores se mostram insuficientes para demonstrar a relação entre as variáveis. A não confirmação de correlação significativa não implica porém, na indiferença da fertilidade do solo para a produtividade da cultura da soja. Talvez, o fato da área experimental apresentar praticamente todos os nutrientes em níveis adequados à produção, seja a mais provável causa do ocorrido.

5. CONCLUSÕES

As técnicas geoestatísticas detectaram e descreveram a variabilidade espacial da produtividade e da maioria dos atributos físicos e químicos do solo. No entanto, a adoção de grades amostrais menores para identificação da dependência espacial de todos os atributos do solo se faz necessário.

Com base nos valores de alcance definidos pode-se estabelecer grades amostrais mais adequadas à cada variável estudada.

O estudo individualizado dos fatores químicos e físicos mostrou-se inadequado para explicar a variabilidade da produtividade da soja.

Caso a AP continue levando em consideração apenas a fertilidade do solo para manejo regionalizado, como é praticado usualmente, esta tecnologia corre o risco de não proporcionar incrementos substanciais de produtividade.

Os dados apontaram grande relevância da qualidade física do solo para a produção da soja.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOCK, B.; PACHEPSKY, Y. Holes in precision farming: mechanistic crop models. In: STAFFORD, J. V. (ed). **Precision Agriculture: Spatial variability in soil and crop**. Vol 1. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1997. p.397-404.

ALVAREZ V. V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.25-32.

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

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.609-617, 2004.

BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; SANTOS, W. R. dos.; ABREU, M. F. de. Diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando-se a constante de sensibilidade dos nutrientes de acordo com a intensidade e frequência de resposta na produção. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.2, p.253-263, 2004.

BEUTLER, A. N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro**. 2003. 126f. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal - SP.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.

BHATTI, A. U. et al. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environment**, New Work, v.37, n.3, p.181-191, 1991.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. **Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura da soja**. Maracajú: Fundação MS, 2008. (Parecer técnico apresentado para Tecnologia de produção de soja e milho 2008/2009).

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

CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (Boletim Técnico n.º106).

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. E. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.4, p.1501-1511, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.237-243, 2011.

CARVALHO, J. R.; VIEIRA, S. R.; MARINHO, P. R.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C.; POTT, C. A.; DUFRANC, G. **Avaliação da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo sob semeadura direta em São Paulo**. Campinas: Embrapa-SNT, 2001. 4p. (Comunicado Técnico).

CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. de P.; FREDDI, O. da S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.76-771, 2006.

CHEN, F.; KISSEL, D. V.; WEST, L. T.; ADKINS, W. Field scale mapping of surface soil clay concentration. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.5, p.7-26, 2004.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.

COELHO, A. M. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2005. 60p. (Documentos 46).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo primeiro levantamento. Brasília: CONAB, 2012. 29 p.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

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

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. de P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.43, n.3, p.453-461, 2012.

DAMPNEY, P. M. R.; MOORE, M. Precision agriculture in England: current practice and research-based advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.661-673.

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

ELTZ, F.L.P.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.259-267, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja - região Central do Brasil - 2007. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 224p.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1097-1104, 2003.

FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, M. V.; VIEIRA, S. R.; FRIZZONE, J. A. Efeito da variabilidade do armazenamento de água no solo na qualidade da irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2 p.150-153, 1999.

FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R. da; OLIVEIRA, G. C. de; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.1, p.22-30, 2007.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Anais...** Dourados, MS: Embrapa-CPAO, 1998. p.76-80.

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

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

GUEDES FILHO, O. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Gestão dos Recursos Agroambientais) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas - SP.

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energias, 1988. 145p.

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

LIER, Q. J. V (Ed.). **Física do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2010. 298p.

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.6, p.1208-1211, 1983.

KEMPER, W. D. ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986, p.425-441.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

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

LARK, R. M.; BOLAN, H. C.; MAYR, T.; BRADLEY, R. I.; BURTON, R. G. O.; DAMPNEY, P. M. R. Analysis of yield maps in support of field investigation of soil variation. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2.,1999, Odense, Denmark. **Proceedings...** Sheffield, England: Academic Press, 1999. p.151-162.

LE CLERG, E. L.; LEONARD, W. H.; CLARK, A. G. **Field plot technique**. Minneapolis: Burgess, 1962. 373p.

LIMA, J. S. de S.; OLIVEIRA, R. B.; QUARTEZANI, W. Z. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-amarelo sob cultivo de pimenta-do-reino. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.15 n.3, p.290-298, 2007.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: POTAFOS, 1984. 162p.

LOPES, A. S.; GUIDOLIN, J. A. **Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1989. 50p. (Boletim Técnico, 2).

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press, 1995, p.508-536.

MILANI, L.; SOUZA, E. G. de; URIBE-OPAZO, M. A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA, J. O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.4, p.591-598, 2006.

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

MOLIN, J. P. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 1., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, SP: ESALQ, 2004. 1 CD-ROM.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.1, p.83-92, 2002.

MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: o autor, 2001. 83p.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão, Parte II: Diagnósticos, Aplicação Localizada e Considerações Agronômicas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.2, p.108-121, 1997.

MOTOMIYA, A. V. A.; MOTOMIYA, W. R.; MOLIN, J. P.; LIRA, A.; OLIVEIRA, J. R. G.; BISCARO, G. A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 4, p. 1-9, 2011.

NOGUEIRA, M. C. S. **Experimentação agrônômica I**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. 463p.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. In: COELHO, A.M. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2005. 60p. (Documentos 46).

PONTELLI, C. B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão**. 2006. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

QUEIROZ, D. de M.; DIAS, G. de P.; MANTOVANI, E. de C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM et al. (Eds.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p.1-42.

RABAH, F. A.; ALMEIDA GABRIEL, L. R. Dependência espacial de atributos do solo obtidos por meio de semivariogramas e autocorrelogramas. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.24, n.2, p.77-91, 2009.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. Interpretação de resultados de análise de solo. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C., (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1996. p.8-13.

RAIJ, B. van; SILVA, N. M.; BATAGLIA, O. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1985. 107p.

REICHERT, J. M.; REINERT, J. M.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.29-48, 2003.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M., CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Anais...** Teresina, PI: Embrapa-CPAMN, 2010. 1 CD-ROM.

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

RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V.H. (Eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152p.

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos do solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 116f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu - SP.

RODRIGUES, M. F.; KAISER, D. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; KUNZ, M.; REICHERT, J. M. Distribuição de poros e condutividade hidráulica saturada em Argissolo submetido a diferentes manejos e níveis de compactação. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ. 2008.

ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; ROSA, C. D. C. J.; RAMOS, A. Z. Manejo do solo e de culturas e seu efeito sobre soja e atributos de um latossolo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. **Anais...** Santa Maria, RS. 2004.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; DELLA FLORA, L. P.; SMANIOTTO, R. F. F. É chegada a hora da integração do conhecimento. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, jan. 2009. Disponível em: < <http://www.plantiodireto.com.br/imprime.php?cod=907>>. Acesso em: 06 mar. 2012.

SANTOS, G. A. et al. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 636p.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; RAPASSI, R. M. A.; MURAISHI, C. T.; MALLER, A.; MATOS, F. A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do cerrado brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.3 , p.313-321, 2006.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: BORÉM et al. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p.109-145.

SERRA, A. P. **Avaliação do estado nutricional da cultura do algodoeiro**. 2008. 97f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

SILVA, F. M. da; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; MARQUES, J. J.; MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos químicos e da produtividade na cultura do café. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2 , p.401-407, 2007.

SILVA, F. M. da; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; VIEIRA, L. H. de S.; OLIVEIRA, E. de. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.1, p.231-241, 2008.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

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

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

SOUSA, D. M. G. S.; LOBATO, E. **Cerrado, correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 2002. 416 p.

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

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

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Campina Grande, v.8, n.2, p.183-190, 2008.

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

SPERA, S. T.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; KLEIN, V. A.; DENARDIN, J. E.; SANTOS, H. P. dos. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Revista Agrarian**, Dourados, v.4, n.14, p.313-323, 2011.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; TOMM, G. O.; FONTANELI, R. S. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Científica Rural**, v.9, n.1, p.23-31, 2004.

STOLZY, L. H. Soil atmosphere. In: CARSON, E.W. (Ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p.335-361.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38 n. 1, p.45-94, 1985.

TREVISAN, L. R.; LANA, R. M. Q.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LACERDA, Z. C.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade vertical de pH, bases e enxofre em Latossolo Vermelho cultivado sob sistema plantio direto e cultivo mínimo. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v.7, p.1-11, 2008.

VASCONCELOS, R. F. B. de; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S. de; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo Distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.309-316, 2010.

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

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

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.1-45, 2002.

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

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. In: STEWART, B.A. (Ed.). **Advance in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v.3, p.1-70.

WERNER, V. **Utilização de recursos de agricultura de precisão na geração de mapas de atributos, mapas de produtividade e aplicação de insumos à taxas variáveis**. 2004. 125f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

WILDING, L. P.; DRESS, L. R. Spatial variability and pedology and pedology. In: WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; HALL, G.F. **Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions**. New York: Elsevier, 1983. p.83-166.

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

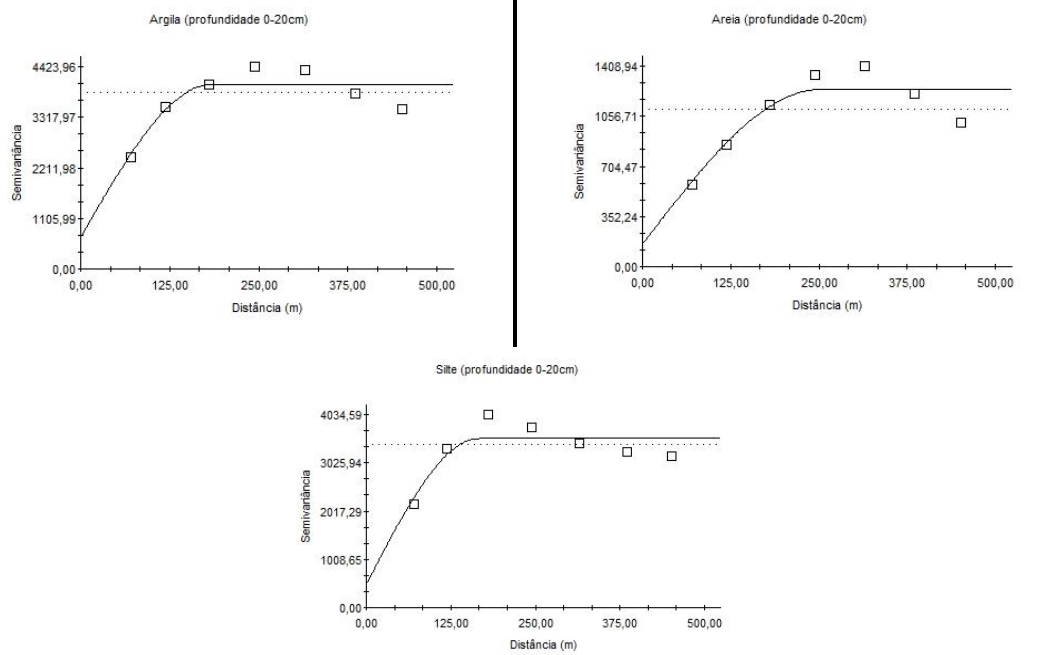
ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.389-400, 2010.

ZIMMERMAN, D. L., ZIMMERMAN, M. B. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary Kriging predictors. **Technometrics**, v.33, p.77-99, 1991.

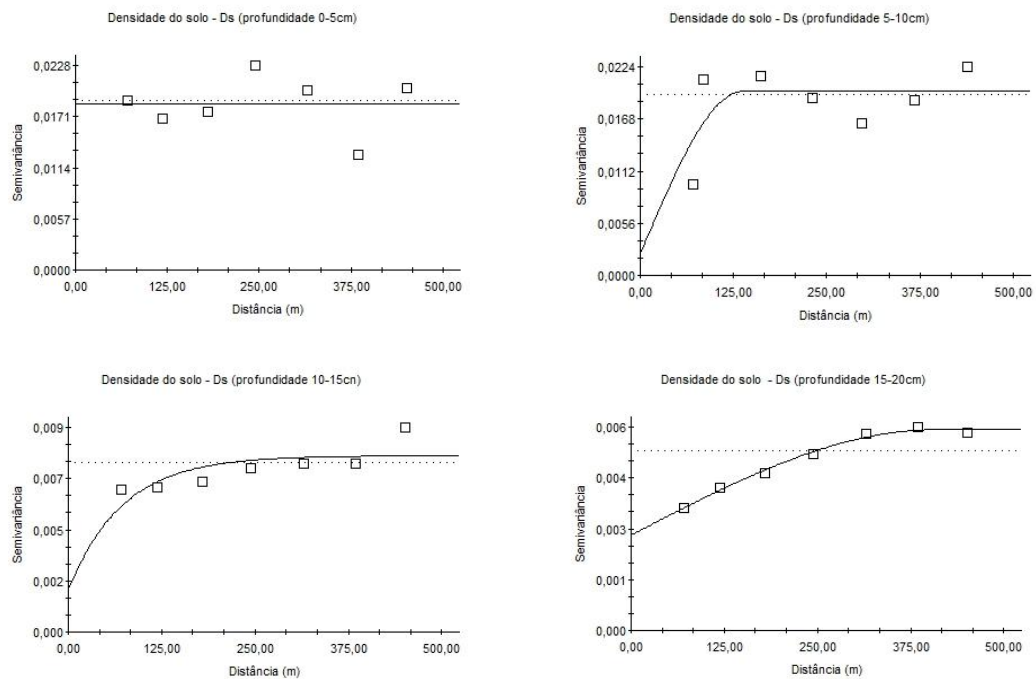
7. ANEXOS I - Semivariogramas

7.1. Atributos físicos do solo

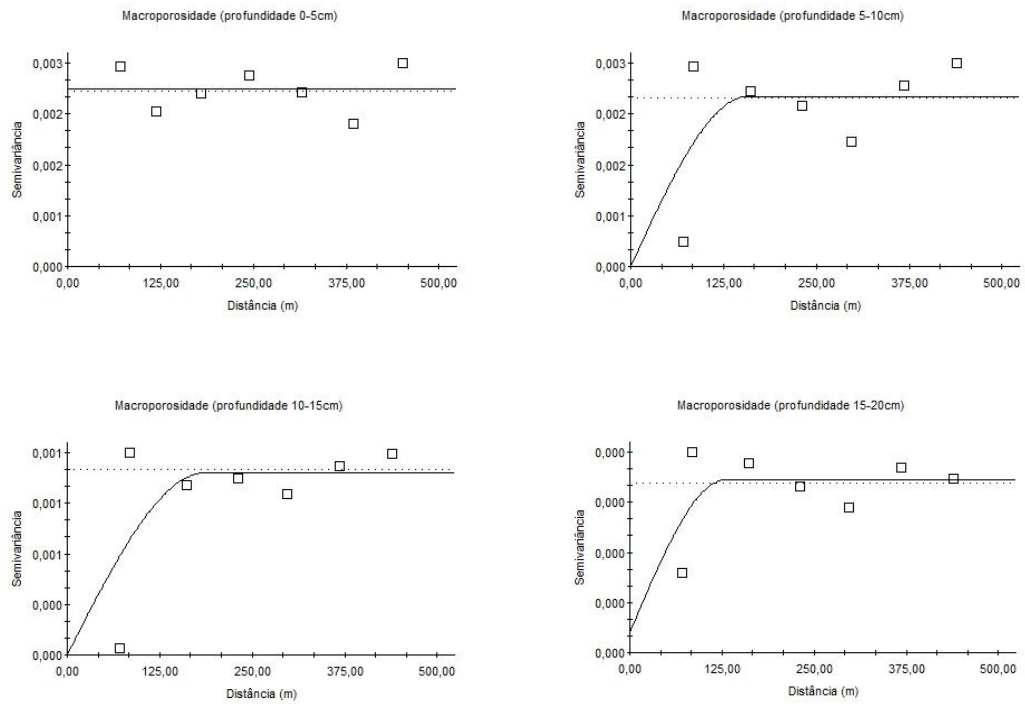
a) Textura: Argila, Areia e Silte (0,0 a 0,20 m)



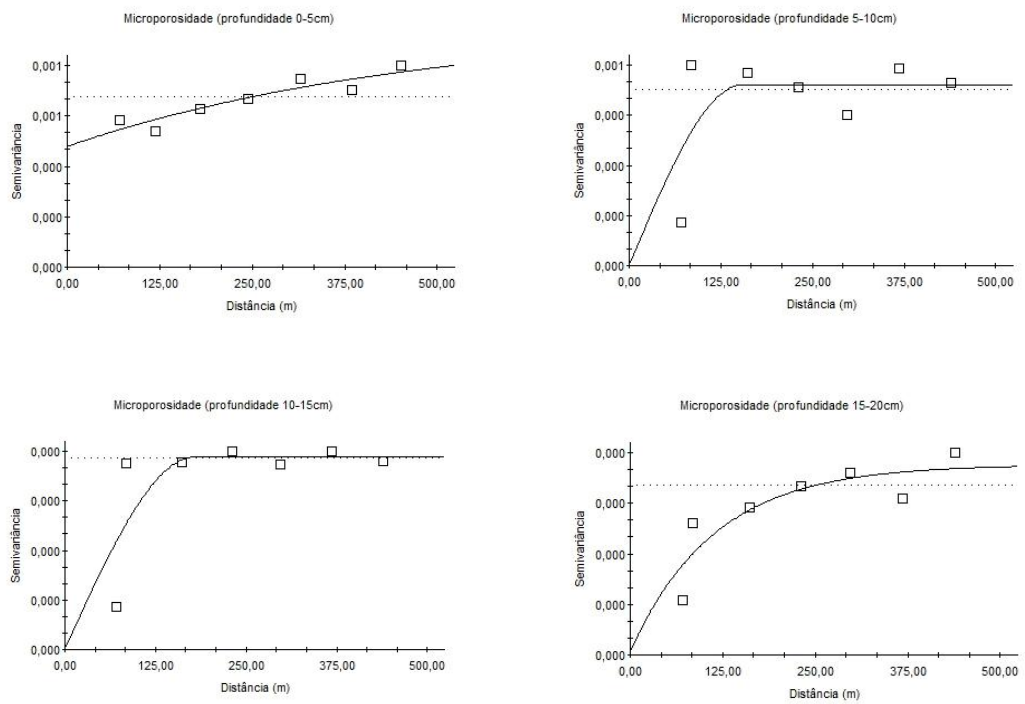
b) Densidade do solo - D_s (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



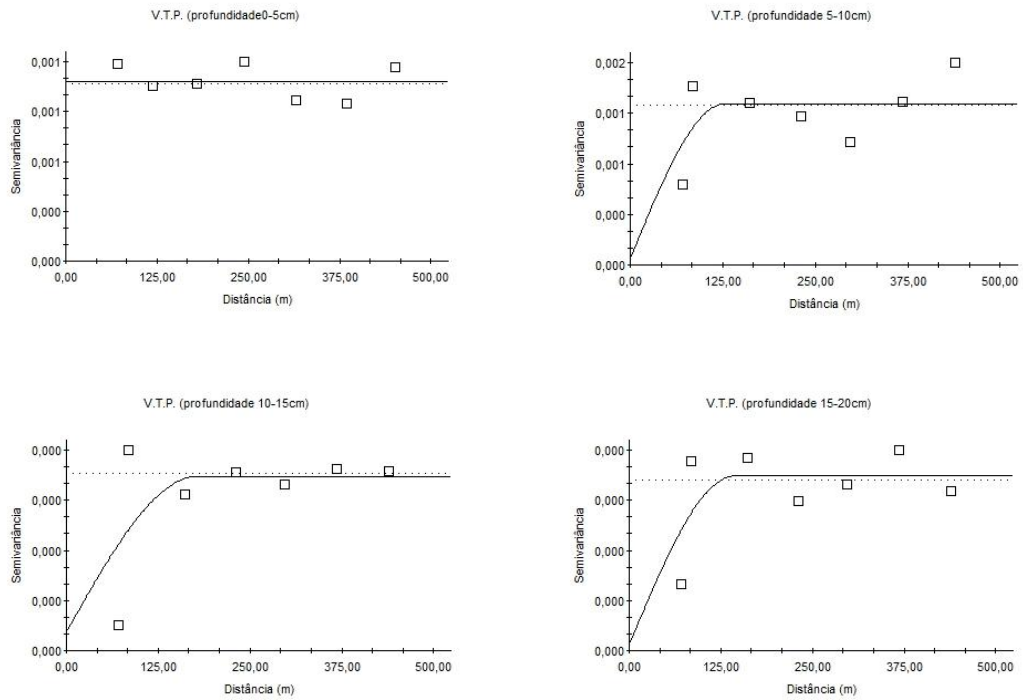
c) Macroporosidade - Ma (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



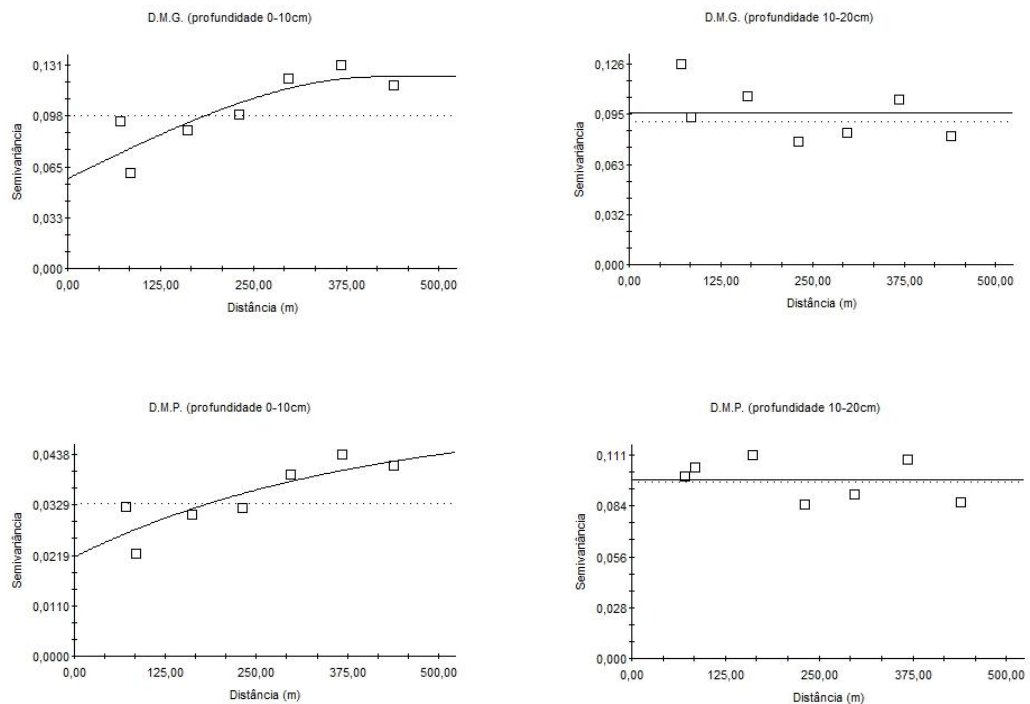
d) Microporosidade - Mi (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



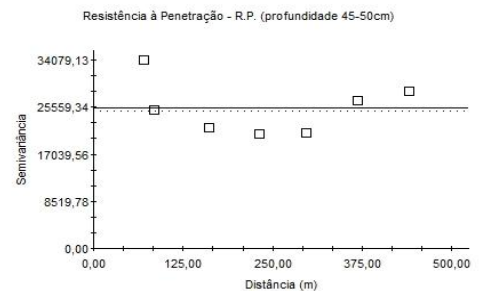
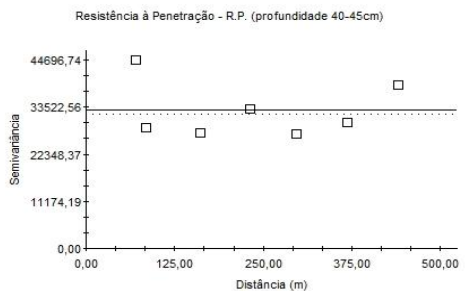
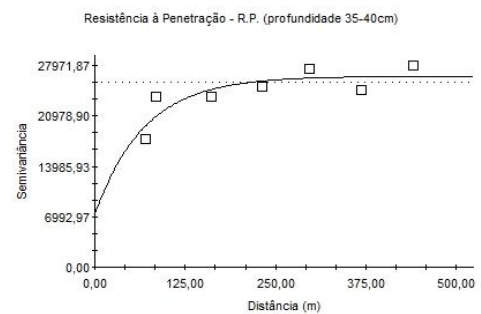
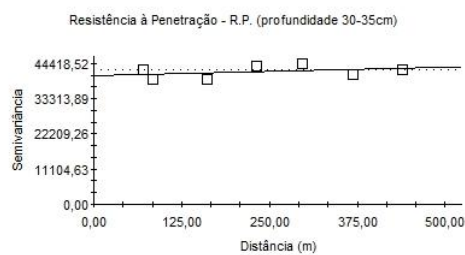
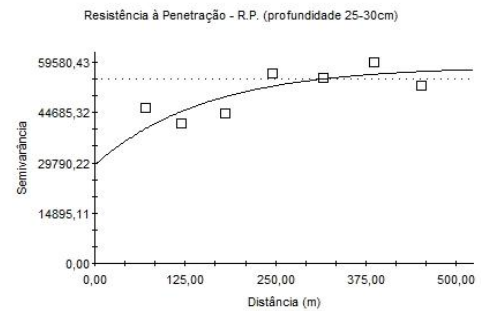
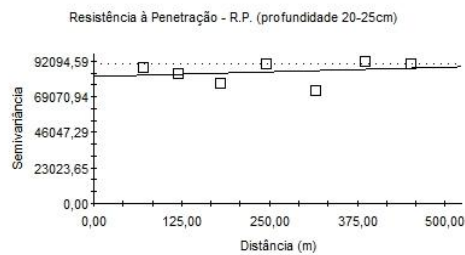
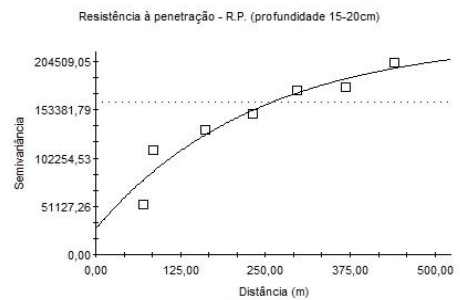
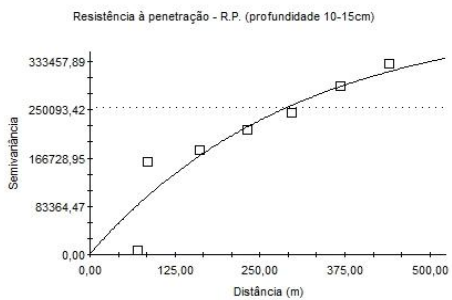
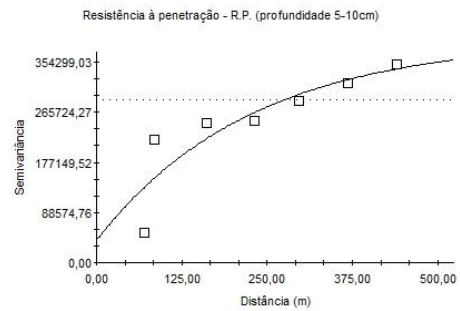
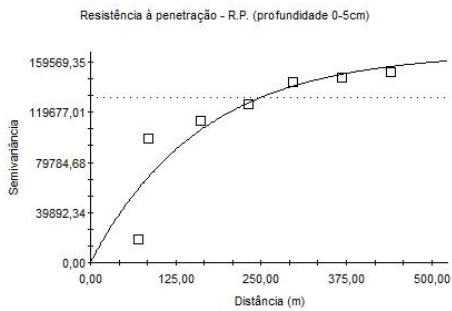
e) Volume Total de Poros (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



f) Diâmetro Médio Geométrico - DMG e Diâmetro Médio Ponderado - DMP (0,0 a 0,10 m; e 0,10 a 0,20 m)

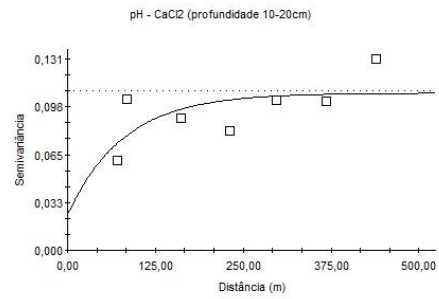
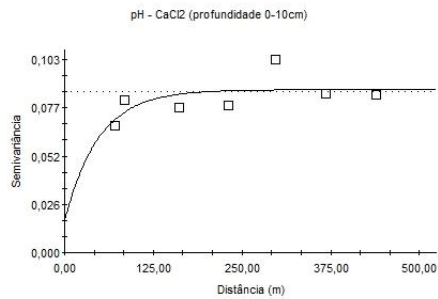


g) Resistência à Penetração - RP (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m; 0,20 a 0,25 m; 0,25 a 0,30 m; 0,30 a 0,35 m; 0,35 a 0,40 m; 0,40 a 0,45 m; e 0,45 a 0,50 m)

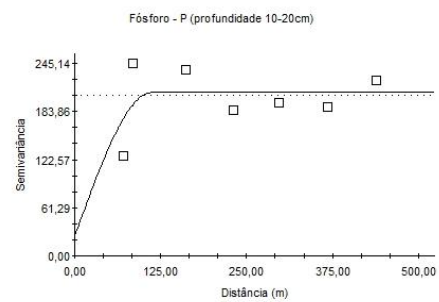
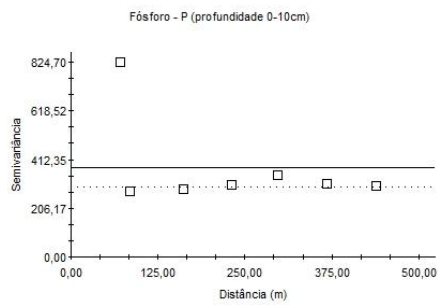


7.2. Atributos químicos do solo

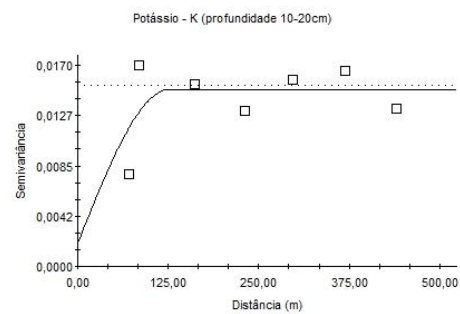
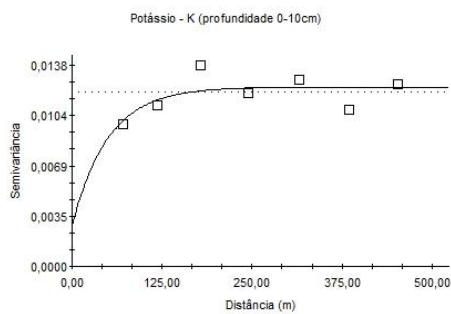
a) Acidez ativa - pH em CaCl_2 (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



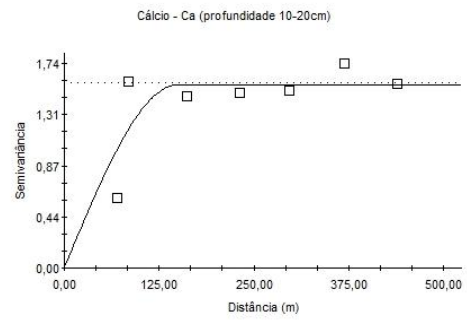
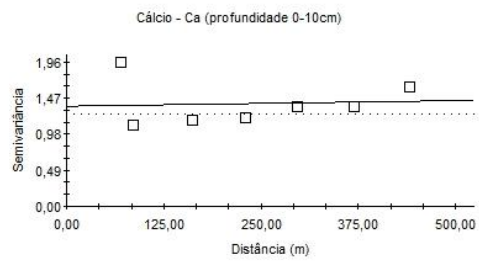
b) Fósforo - P (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



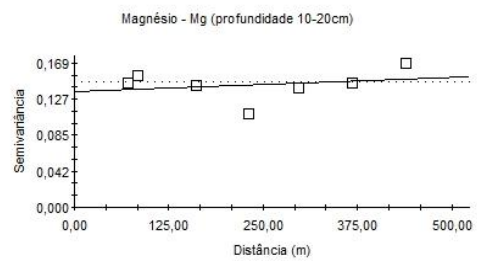
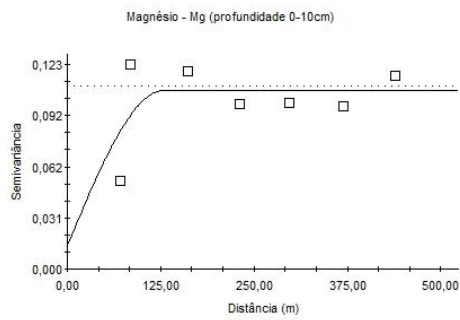
c) Potássio - K (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



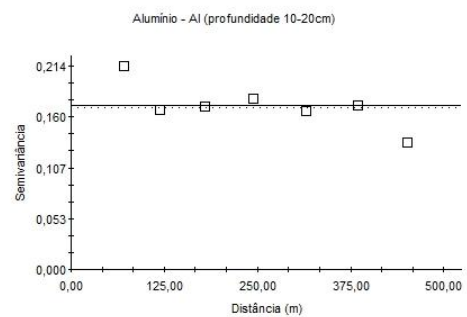
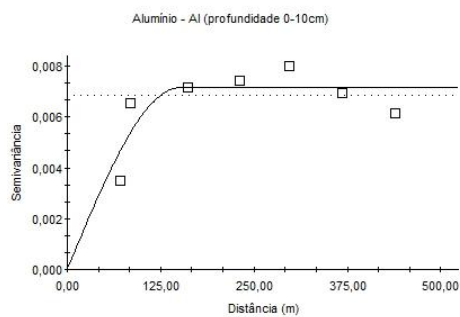
d) Cálcio - Ca (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



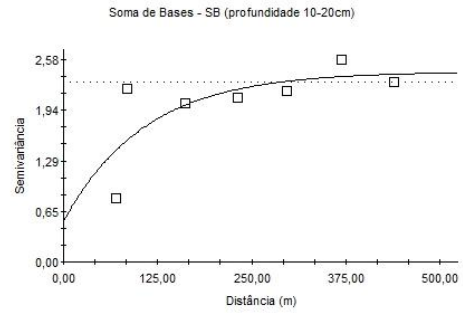
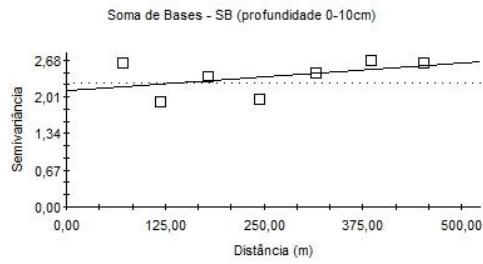
e) Magnésio - Mg (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



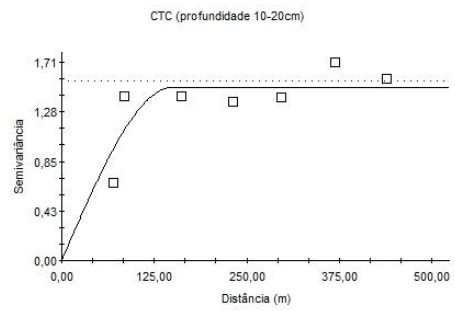
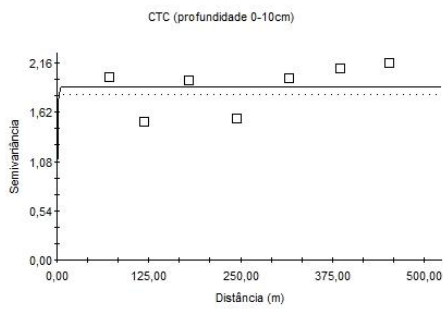
f) Alumínio - Al (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



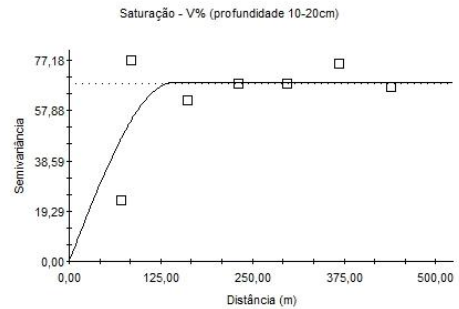
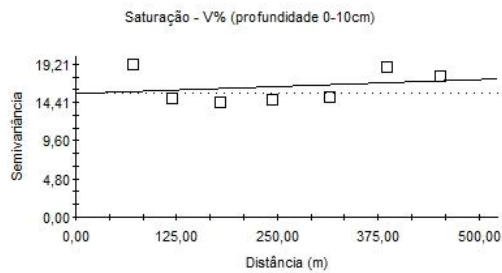
g) Soma de Bases - SB (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



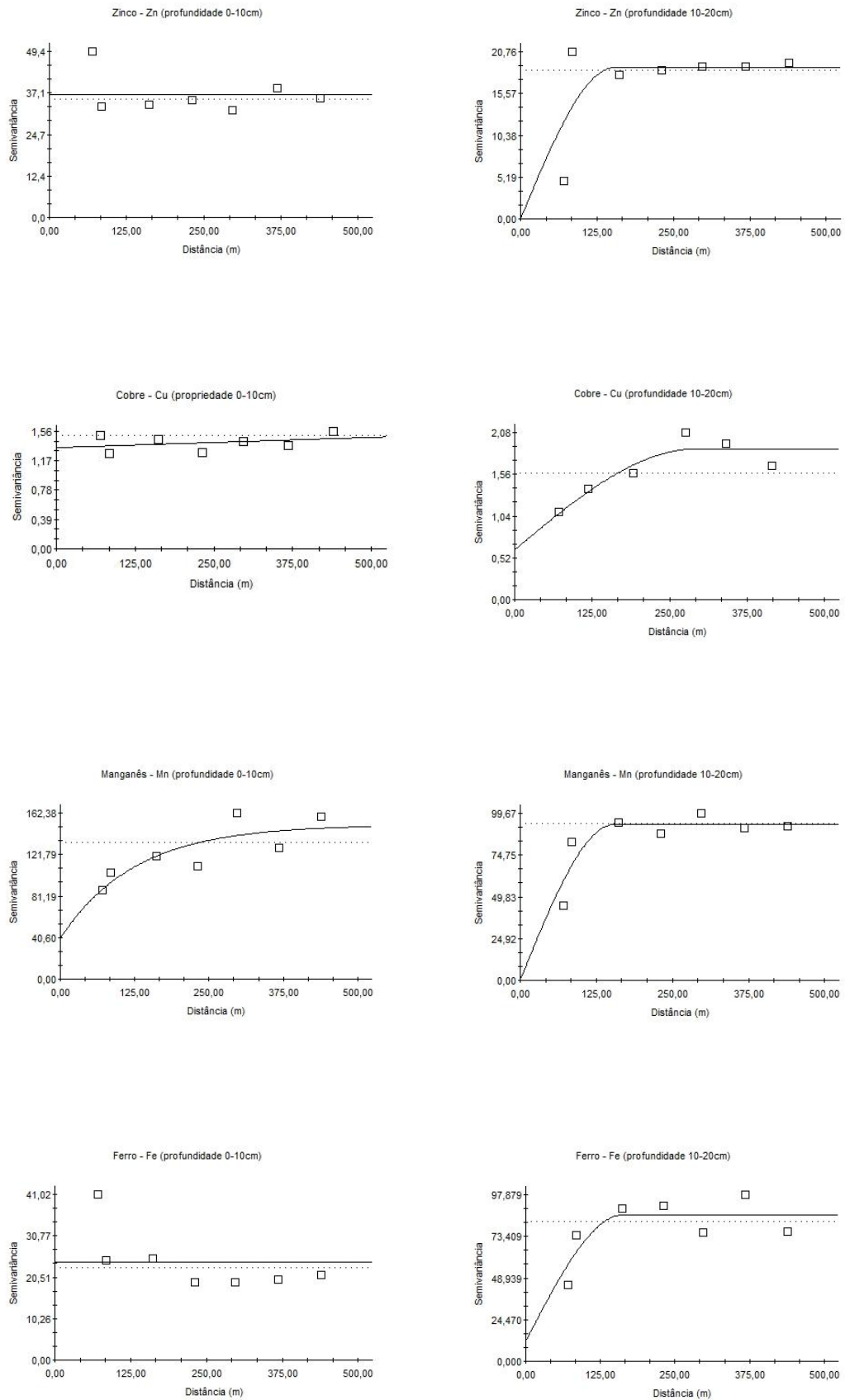
h) Capacidade de Troca Catiônica - CTC (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



i) Saturação por Bases (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



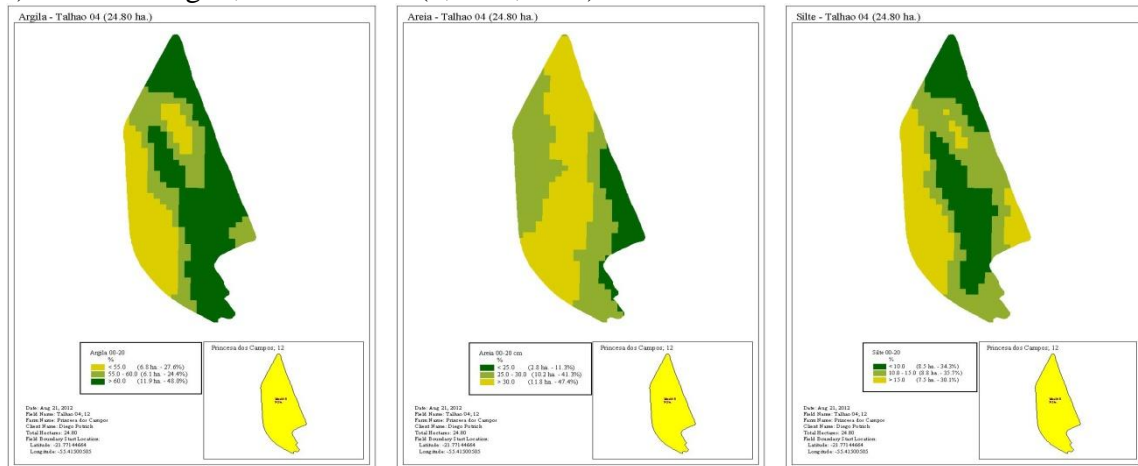
j) Zinco - Zn, Cobre - Cu, Manganês - Mn e Ferro - Fe (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



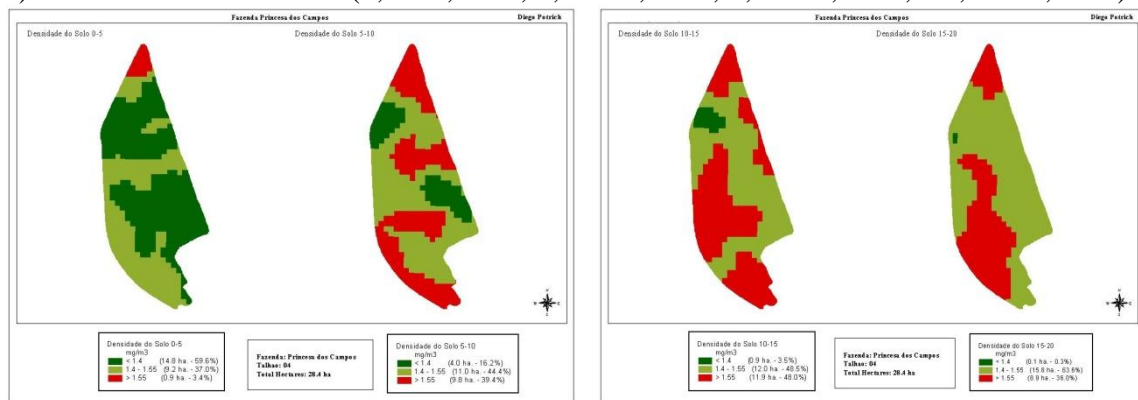
8. ANEXOS II - Mapeamento da variabilidade

8.1. Atributos físicos do solo

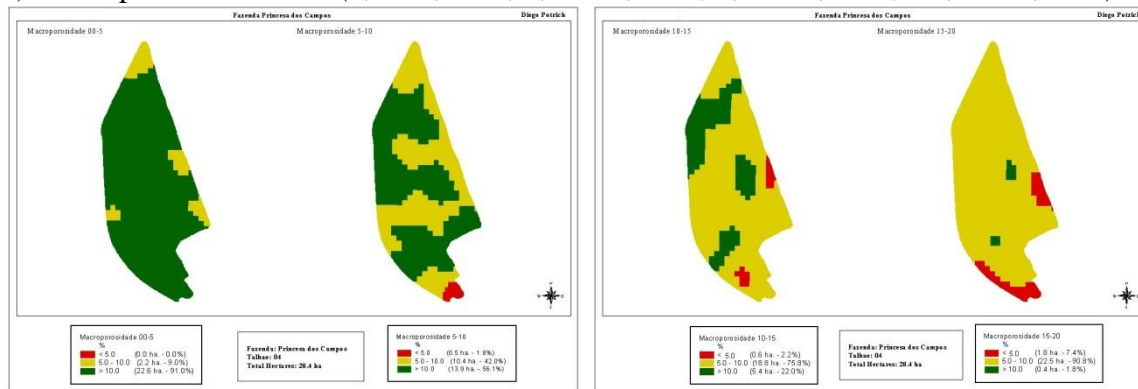
a) Textura: Argila, Areia e Silte (0,0 a 0,20 m)



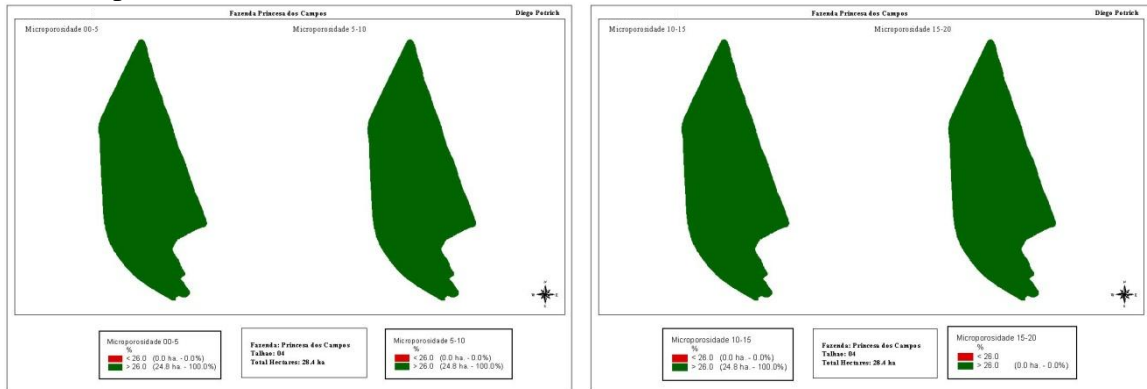
b) Densidade do Solo - Ds (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



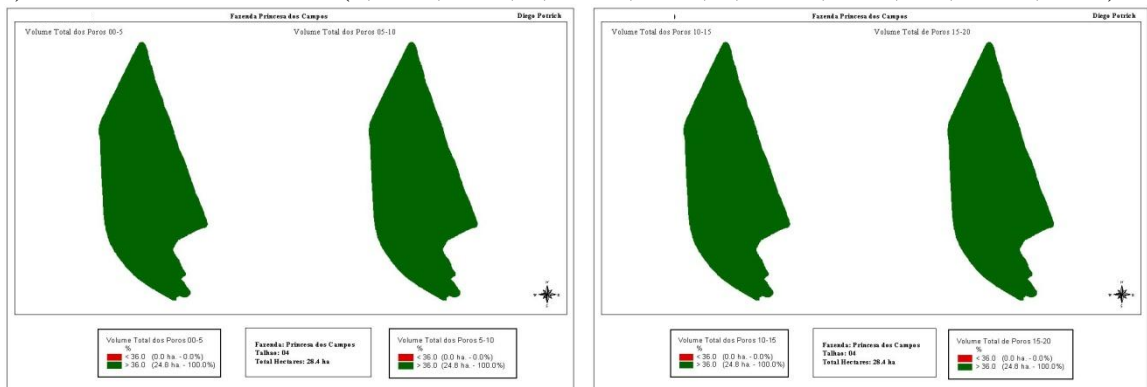
c) Macroporosidade - Ma (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



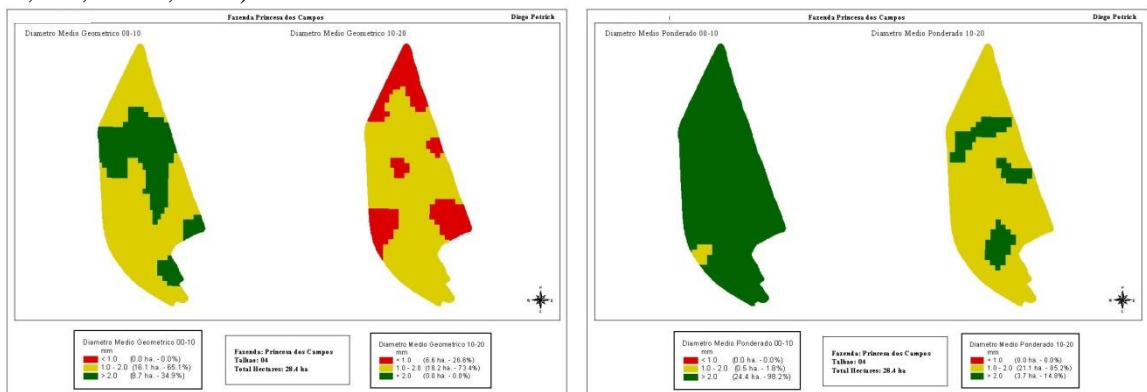
d) Microporosidade - Mi (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



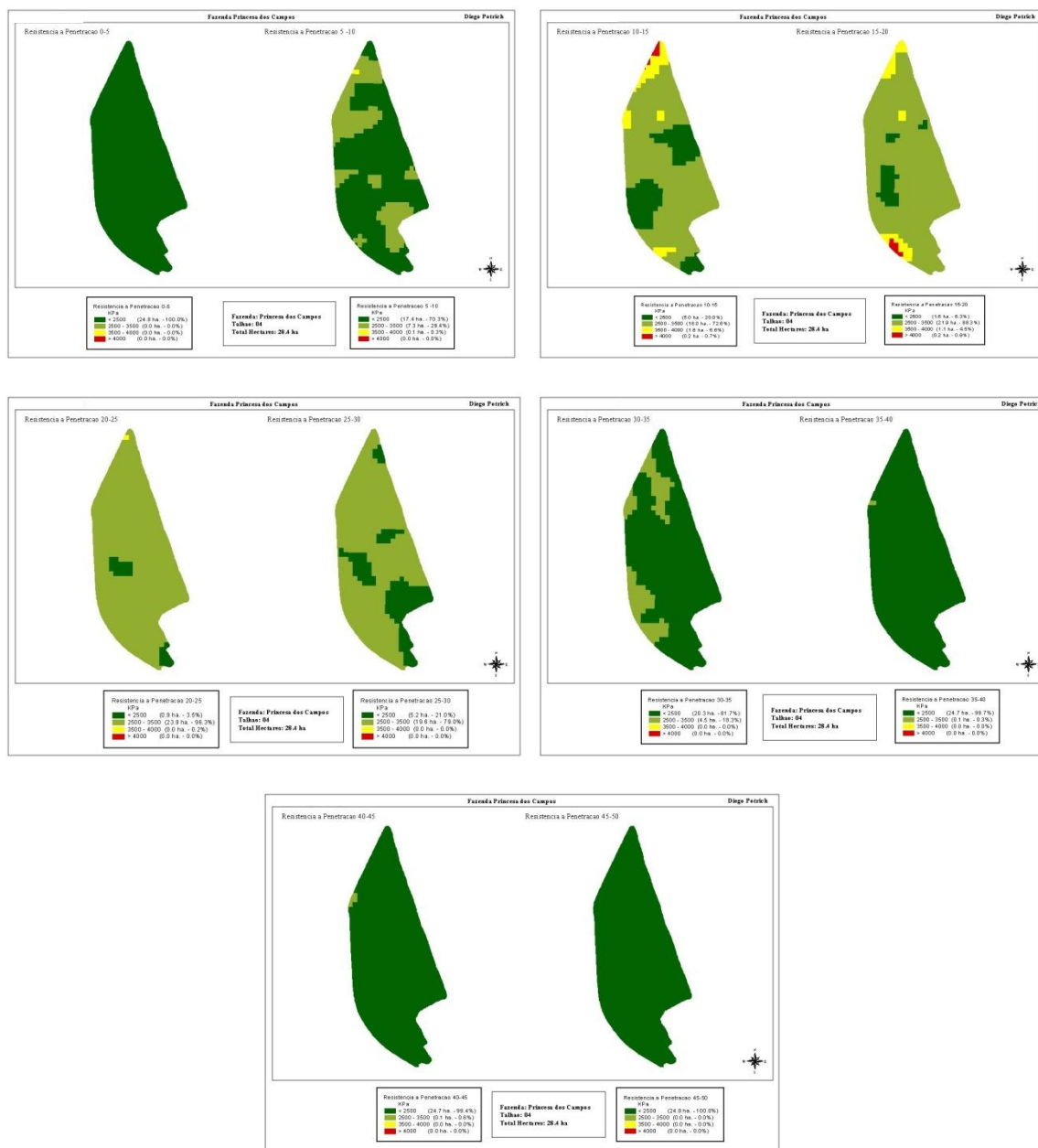
e) Volume Total de Poros (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m)



f) Diâmetro Médio Geométrico - DMG e Diâmetro Médio Ponderado - DMP (0,0 a 0,10 m; e 0,10 a 0,20 m)

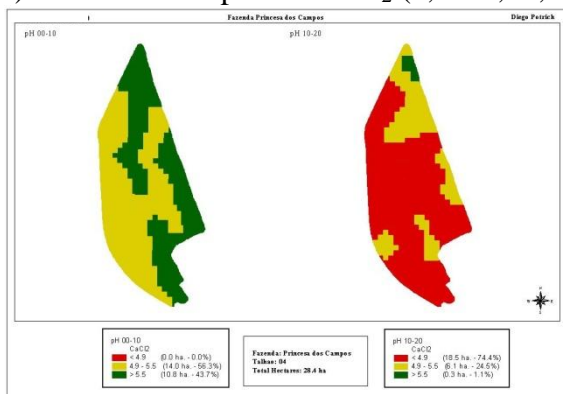


g) Resistência à Penetração - RP (0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,15 m; e 0,15 a 0,20 m; 0,20 a 0,25 m; 0,25 a 0,30 m; 0,30 a 0,35 m; 0,35 a 0,40 m; 0,40 a 0,45 m; e 0,45 a 0,50 m)

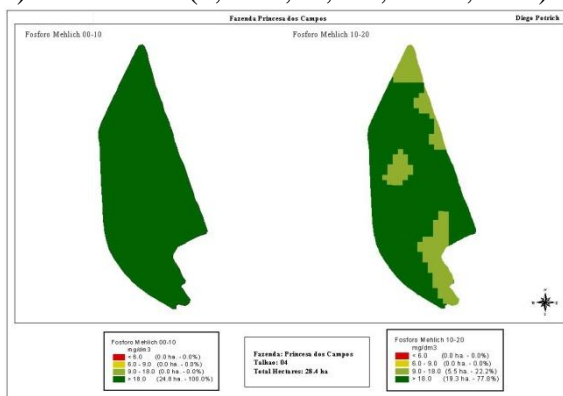


8.2. Atributos químicos do solo

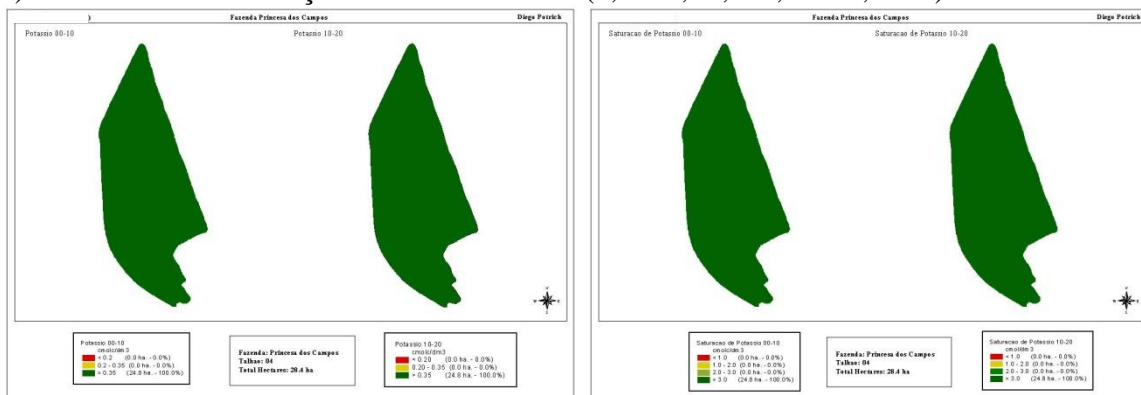
a) Acidez ativa - pH em CaCl₂ (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



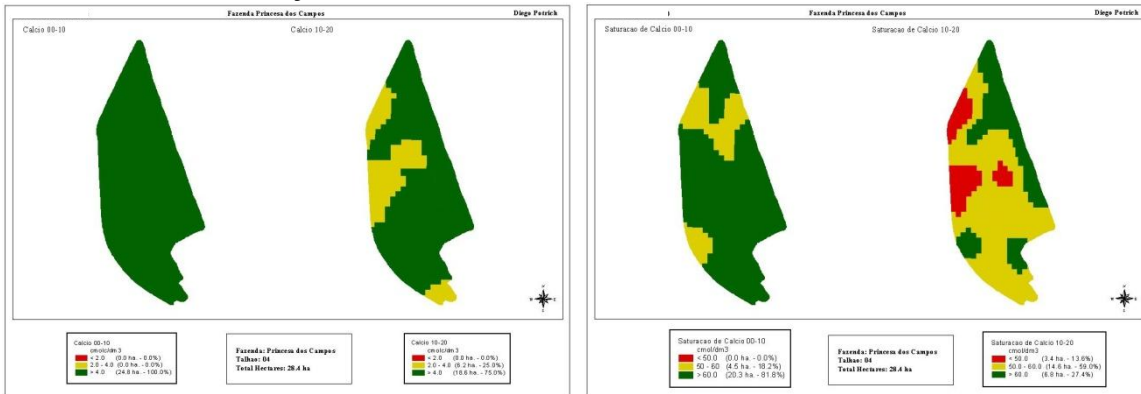
b) Fósforo - P (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



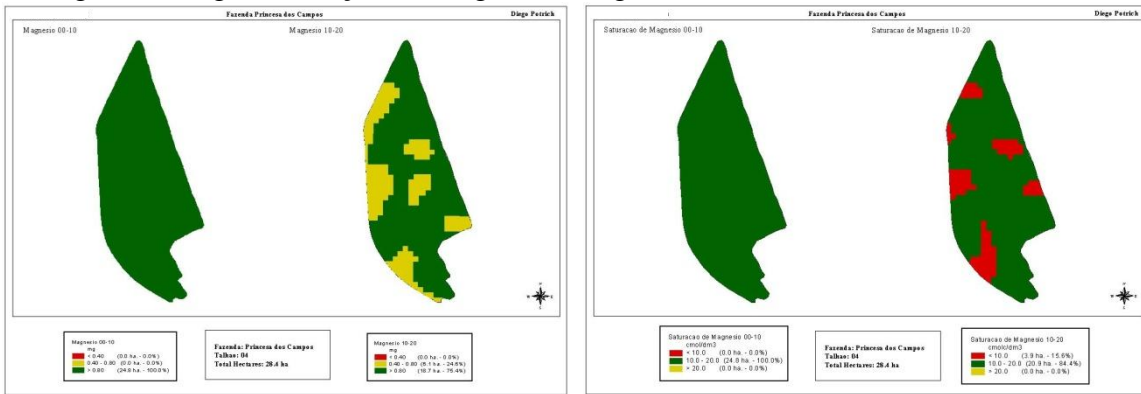
c) Potássio - K e Saturação de Potássio - K% (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



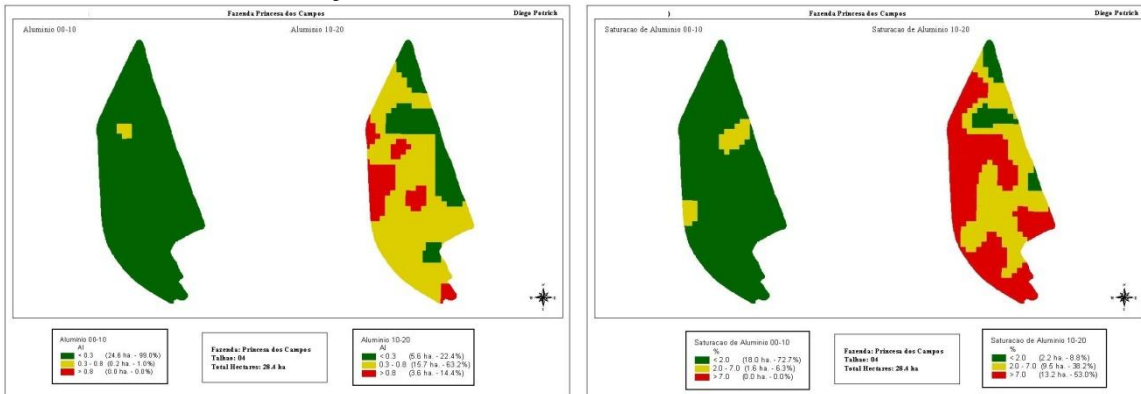
d) Cálcio - Ca e Saturação de Cálcio - Ca% (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



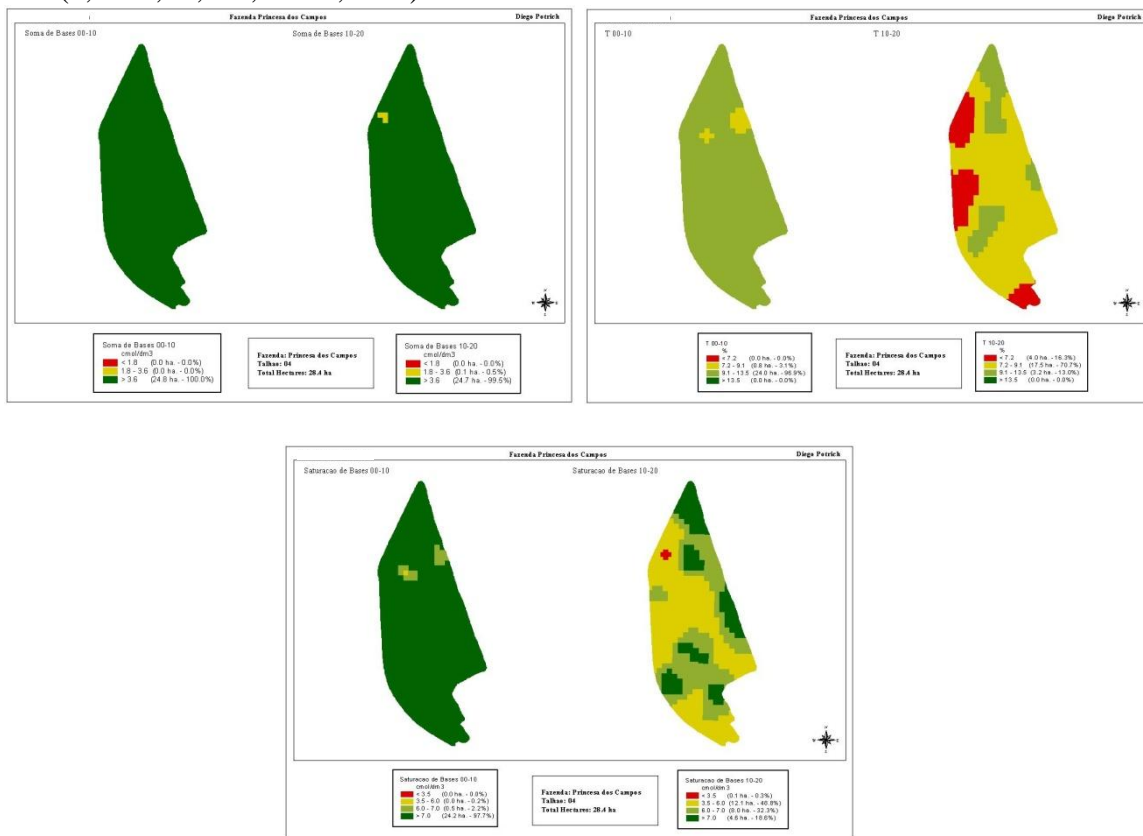
e) Magnésio - Mg e Saturação de Magnésio - Mg% (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



f) Alumínio - Al e Saturação de Alumínio - m% (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



g) Soma de Bases - SB, Capacidade de Troca Catiônica - CTC e Saturação por Bases - V% (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)



h) Zinco - Zn, Cobre - Cu, Manganês - Mn e Ferro - Fe (0,0 a 0,10; e 0,10 a 0,20 m)

