

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E  
FÍSICOS DO SOLO, E DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS**

**IGOR QUEIROZ MORAES VALENTE**

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2017**

# **VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO, E DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS**

Igor Queiroz Moraes Valente

Engenheiro Agrícola

Orientadora: Prof. Dra. Anamari Viegas de A. Motomiya

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez

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

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2017

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

V155v Valente, Igor Queiroz Moraes  
Variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo, e da  
produtividade de culturas / Igor Queiroz Moraes Valente -- Dourados: UFGD,  
2017.  
50f. : il. ; 30 cm.  
  
Orientadora: Anamari Viegas de Araujo Motomiya  
Co-orientador: Jorge Wilson Cortez  
  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) • Faculdade de Ciências  
Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados.  
Inclui bibliografia  
  
1. Geoestatística. 2. Produtividade. 3. Mapeamento. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS, E DA  
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS

por

Igor Queiroz Moraes Valente

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

Aprovada em: 24/02/2017



---

Prof. Dra. Anamari Viegas de Araujo Motomiya  
orientador – UFGD



---

Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando  
UFGD



---

Prof. Dra. Elka Élice Vasco de Miranda  
UEMS

Primeiramente a Deus, por suas bênçãos, seu amor e seus cuidados, sempre presentes em minha vida.

Aos Meus pais Elton e Jandira, pela educação, amor, carinho e seu incondicional apoio.

Aos meus tios Marcos e Janete, por serem como pais para mim, por todo amor, educação, carinho, apoio e preocupação.

À minha irmã Rafaela, pelos momentos compartilhados, pela paciência e amor.

***Dedico***

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD e ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da FCA, pela oportunidade e realização do curso de pós-graduação em nível de mestrado.

À equipe da Comid Máquinas Ltda, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho de campo.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Ao proprietário da Fazenda Santa Hilda, Alan Kruger, por ceder a área experimental e permitir a realização do trabalho em sua propriedade.

À professora Dra. Anamari Viegas de Araujo Motomiya, pela orientação, apoio, incentivo, confiança, lealdade e oportunidades oferecidas durante todo o curso de graduação e mestrado.

Ao professor Dr. Jorge Wilson Cortez, pela co-orientação, confiança, lealdade e apoio para a realização deste trabalho.

Aos grandes colegas Victor Hugo Cavasini e Diego Ferreira da Silva, pela imensa ajuda na realização deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório de fertilidade do solo e física do solo da FCA, João Machado e Camila Farah, pela atenção e contribuição na análise dos dados deste trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola da FCA, que contribuíram para o meu crescimento e amadurecimento profissional.

Obrigado por tudo!

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

**Charles Chaplin**

## SUMÁRIO

	<b>Páginas</b>
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Aspectos econômicos das culturas da soja e do milho .....	10
2.2 Agricultura de precisão.....	11
2.3 Unidades de gestão diferenciadas.....	13
2.4 Geoestatística.....	13
2.5 Krigagem Ordinária.....	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
3.1 Local.....	16
3.2 Atributos avaliados.....	17
3.2.1 Resistência mecânica à penetração e teor de água do solo.....	17
3.2.2 Atributos químicos e granulometria do solo.....	18
3.2.3 Produtividade de grãos .....	18
3.3 Análise dos dados.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
4.1 Resistência mecânica do solo à penetração .....	20
4.2 Granulometria e atributos químicos do solo.....	25
4.2.1 Granulometria do solo .....	25
4.2.2 Atributos químicos do solo.....	28
4.3 Produtividade de grãos de soja e milho .....	37
5 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

VALENTE, I.Q.M. **Variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo, e da produtividade de culturas**. 50 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

### RESUMO

Conhecer a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo é importante para o manejo das culturas de importância agrônômica como soja e milho. O objetivo deste trabalho foi investigar a variabilidade espacial, por meio de técnicas de análise geoestatística dos atributos químicos e físicos do solo (textura e resistência à penetração), e caracterizar unidades de gestão diferenciada de acordo com os mapas temáticos interpolados por krigagem ordinária e krigagem indicatriz. O trabalho foi conduzido em lavoura comercial com sucessão das culturas da soja e do milho, semeada no espaçamento 0,45 m sob Latossolo Vermelho distroférico, em um talhão de 126 ha, localizada no município de Dourados-MS. Os dados foram coletados em 126 pontos separados por 100 m entre si para os atributos químicos do solo e 60 pontos para a granulometria do solo. As amostras compostas foram formadas por oito (8) sub-amostras tomadas aleatoriamente ao redor de cada ponto amostral, nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m para a avaliação dos atributos químicos do solo e a granulometria. A amostragem referente ao estudo de resistência do solo à penetração foi realizada com penetrômetro eletrônico em 126 pontos até a profundidade de 0,40 m. De acordo com os mapas, os atributos químicos encontraram-se com índices considerados altos para Ca, Mg, P e K. Observou-se que a maior parte da área apresenta resistência à penetração entre 2 a 4 MPa, o que demonstra não haver necessidade de realizar um processo de revolvimento do solo, entretanto caso necessite, as camadas a serem revolvidas serão nas profundidades intermediárias. Os mapas de produtividade evidenciam pontos da área com baixa produtividade, além de pontos na bordadura da área, e por fatores climatológicos influenciarem diretamente na produtividade, no entanto sua produção ao longo das safras foi satisfatória.

**Palavras-chave:** geoestatística, produtividade, mapeamento.

VALENTE, I.Q.M. **Variabilidade Espacial de Atributos Químicos e Físicos do solo, e da Produtividade de Culturas**. 50 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

#### **ABSTRACT**

Knowing the spatial variability of soil chemical and physical attributes is important for the management of crops of agronomic importance such as soybean and corn. The objective of this study was to investigate the Spatial analysis, by means of geostatistical analysis techniques of soil chemical and physical attributes (texture and resistance to penetration), and characterize units of differentiated management according to the thematic maps interpolated by ordinary kriging and indicative kriging. The work was carried out in a commercial field with succession of the soybean and corn crops, sown in the 0.45 m spacing under Distroferric Red Latosol, in a plot of 126 ha, located in the municipality of Dourados-MS. The data were collected at 126 points separated by 100 m from each other for soil chemical attributes and 60 points for soil granulometry. The composite samples were composed of eight (8) sub-samples randomly taken around each sampling point, in the layers 0.0-0.10 and 0.10-0.20 m for the evaluation of soil chemical attributes and granulometry. Sampling for the study of soil resistance to penetration was performed with an electronic penetrometer at 126 points to a depth of 0.40 m. According to the maps, the chemical attributes were found with indices considered high for Ca, Mg, P and K. It was observed that most of the area presents resistance to penetration between 2 and 4 MPa, which demonstrates that there is no need To perform a process of soil revolving, however in case it needs, the layers to be revolved will be at the intermediate depths. The productivity maps show points of the area with low productivity, as well as points in the border of the area, and by climatic factors directly influence the productivity, however its production throughout the seasons was satisfactory.

**Key words** : geostatistic , productivity , mapping.

## 1 INTRODUÇÃO

A habilidade das plantas em explorar o solo, em busca de água e nutrientes, visando à maximização de sua produtividade depende grandemente da distribuição de raízes no perfil do solo que, por sua vez, depende das condições físicas e químicas, as quais são passíveis de alterações em função do manejo aplicado (ALVARENGA & CRUZ, 2003).

No entanto, tomadas de decisões em função do manejo adotado vem sendo praticadas de forma errônea e implícita, ou seja, considera-se que a área a ser trabalhada seja homogênea e uniforme, o que vem ocasionando um elevado desperdício de insumos, bem como a degradação física do solo pelo uso intensificado de máquinas agrícolas.

A tecnologia em Agricultura de Precisão (AP) surgiu com uma forte alternativa para correções de possíveis erros existentes na tomada de decisão sobre o manejo adequado a ser adotado. Tal tecnologia já se tornou uma realidade dentro do campo; o conhecimento de que existe uma variabilidade nas áreas agrícolas está difundido, e podem ser relacionado ao histórico da área, tipo de solo entre outros fatores envolvidos bem como as diferenças intrínsecas dentro da área produtiva. As ferramentas da AP possibilitam a verificação, a análise e o controle da desuniformidade das lavouras em áreas de grandes proporções, por meio da identificação de manchas que evidenciam produtividades mais altas e outras mais baixas, bem como a quantidade de insumos distribuídos em diferentes pontos da propriedade. Isto pode proporcionar aos produtores rurais a possibilidade de evoluir em aspectos correlacionados à gestão e otimização de processos produtivos, considerando os recursos naturais disponíveis para aumentar a sua rentabilidade.

Em um contexto geral, a agricultura de precisão tem por objetivo otimizar o uso de insumos, contribuindo assim para a diminuição dos impactos ambientais com o foco no aumento de sua rentabilidade por área cultivada (IMANASU, 2011). Entretanto, a adoção da tecnologia de agricultura de precisão não pode ser realizada adequadamente sem antes ter um conhecimento sobre as variações locais ao longo da área de produção e posteriormente a correta interpretação dos resultados.

Na agricultura de precisão, o manejo da fertilidade do solo pode começar com a amostragem georreferenciada do solo. É uma estratégia em que se utiliza o planejamento em grades amostrais, posteriormente a retirada de amostras a campo,

análise em laboratório, processamento dos dados e por fim os mapas de recomendações e aplicações. Esta técnica visa a economia de insumos, com a aplicação dos mesmos em dose variável dentro de cada talhão, indicando que a prática em dose única resultava em erros maiores, o que é compreensível quando a tomada de decisão pela recomendação em dose única é feita de forma conservadora.

A análise da variabilidade do solo, por meio da análise geoestatística, pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas (TRANGMAR et al., 1985), mas também para aumentar a possibilidade de estimar respostas das culturas sob determinadas práticas de manejo (OVALLES & REY, 1994).

Outra forma de se obter informações sobre a variabilidade são os mapas de produtividade, pois estes possibilitam o reconhecimento e interpretação das causas da variabilidade na produção e particularidades das culturas cultivadas, contribuindo como fator para definição de manejo.

O objetivo deste trabalho foi investigar a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo (textura e resistência à penetração), e caracterizar unidades de gestão diferenciada de acordo com os mapas temáticos interpolados por krigagem ordinária.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aspectos econômicos das culturas da soja e do milho**

A cultura da soja (*Glycine max* (L) Merrill) está entre as oleaginosas mais cultivadas no mundo. Seu elevado teor de proteínas proporciona inúmeras utilizações no complexo industrial. Seu processamento é destinado à produção de óleo e farelo, sendo este, o produto de maior importância econômica quando seu destino é designado para a exportação (GURGEL, 2007).

A expansão da área cultivada com soja deriva do aumento das demandas interna e externa, pois o grão é usado no consumo intermediário para o fornecimento de proteína à indústria animal e para a fabricação de óleos e farelos pelas indústrias de transformação regionais, nacionais e internacionais (PINAZZA, 2007).

No Brasil, o Estado de Mato Grosso do Sul se posiciona como o quinto maior produtor de soja em grãos, representatividade que nas últimas três décadas apresentou maior peso na balança comercial brasileira (BRASIL, 2011). De acordo

com dados da (FAMASUL, 2016), o Estado atingiu uma produção de 7,6 milhões de toneladas de soja na safra 2015/2016, tendo um aumento de 9,4% em relação à última safra, apresentando assim uma média de produtividade estimada em 50,5 30030 kg/ha nos 2,5 milhões de hectares de lavoura cultivada com o cultivo da soja.

Ao longo das últimas décadas, houve um elevado crescimento de produtividade e expansão da área semeada, impulsionando o aumento de produção da cultura (CONAB, 2015). A cultura do milho (*zea mays*) representa um dos principais cereais cultivados em todo o mundo, fornecendo produtos utilizados principalmente para a alimentação humana, animal e matérias-primas para a indústria, pelas características e quantidade das reservas nutritivas acumuladas nos grãos (DOURADO et al., 2004).

Esta cultura é de grande destaque no cenário nacional de produção de grãos, estando entre as três culturas mais cultivadas, contribuindo significativamente para a balança comercial brasileira. A produção de milho no Estado de Mato Grosso do Sul ocorre principalmente na safrinha, sendo caracterizado pela sucessão com soja no verão (EMBRAPA, 2015).

Segundo o levantamento da CONAB, na safra 2015/16 produziu-se aproximadamente 80,20 milhões de toneladas de milho semeados em 15,48 milhões de hectares (CONAB 2016). Neste cenário o Estado de Mato Grosso do Sul é responsável por produzir cerca de 8,55 milhões de toneladas em 1,66 milhões de hectares.

## **2.2 Agricultura de precisão**

A evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global dentre outras, estão proporcionando à agricultura uma nova forma de enxergar a propriedade e suas características específicas. Esta mudança na forma de fazer agricultura está tornando o produtor rural um empresário rural, por controlar cada vez mais a linha de produção (TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002).

Neste cenário surge o interesse crescente pela agricultura de precisão. Resumidamente, a agricultura de precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, com base nas tecnologias de informação para o tratamento da variabilidade espacial. Ela pode ser entendida como um ciclo que se inicia na coleta dos dados, análises e interpretação dessas

informações, geração das recomendações, aplicação no campo e avaliação dos resultados (BERNARDI et al., 2015).

A partir desta premissa, a agricultura de precisão está associada a um conjunto de tecnologias que permite a localização georreferenciada para poder identificar, analisar e interpretar a variabilidade espacial existente nos fatores de produção, tendo como objetivo a otimização e a rentabilidade das culturas, contribuindo assim para a diminuição dos impactos ambientais (MOLIN, 2004).

Segundo Molin et al. (2015), a origem do termo “Agricultura de precisão” está associada em que as lavouras não são uniformes no espaço e nem no tempo, sendo que o termo “precisão” indica o grau da grandeza mensurada, que refere-se a repetitividade na mensuração apresentando uma distorção em sua origem. Para tal, o termo correto seria “exatidão”, onde se faz o uso de recursos, desde o diagnóstico com mais dados juntamente com o auxílio da automação tendo como objetivo o aumento da acurácia envolvida em todo o processo.

De acordo com Brasil (2013), o conceito em agricultura de precisão (AP) tem várias formas de abordagem, mas o objetivo é sempre o mesmo, utilizar estratégias para resolver os problemas da desuniformidade existente nas lavouras sendo possível tirar proveito de tal desuniformidade. São práticas que podem ser desenvolvidas em diferentes níveis de complexidade e com diferentes objetivos.

De acordo com a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão, a definição estabelecida é que se trata de um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando o aumento de retorno econômico e a redução do impacto ao ambiente (BRASIL, 2014).

Considerando-se os dados obtidos em Brasil (2013), observa-se que quanto maior a quantidade de dados, maior será a consistência dessas informações e consequentemente um melhor diagnóstico referente à variabilidade presente. Dessa forma, os mapas de produtividade são fundamentais na interpretação da variabilidade presente nas lavouras. A interpretação é um trabalho complexo, em que devem ser identificados os fatores que podem estar causando as baixas produtividades. Com este intuito devem ser aplicados os conceitos agrônômicos que hoje são conhecidos, porém, diferenciados para cada pequena porção da lavoura.

De acordo com Saraiva et al. (2000), a AP é um novo paradigma de gerenciamento agrícola que está alterando a forma de se praticar agricultura em todo

o mundo. Molin (2001) destacou que, primeiramente, a AP era vista apenas como um conjunto de ferramentas para o manejo localizado da lavoura. Posteriormente, este conceito se transformou numa visão mais sistêmica do conjunto de ações que a compõe, passando a ser um sistema de gestão ou de gerenciamento da produção agrícola, composta por um conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados para otimizar o sistema produtivo, tendo como elemento chave, o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados.

### **2.3 Unidades de gestão diferenciadas**

A demarcação de unidades de gestão diferenciada (UGD) é uma etapa importante em sistemas que aplicam técnicas de AP. Segundo Mann et al.(2010), as UGDs podem ser interpretadas como regiões dentro dos campos de produção que apresentam mínima variabilidade espacial e permanentes ao longo do tempo. Elas são demarcadas normalmente a partir de mapas de fatores não antrópicos e permanentes da área como parâmetros de solo (tipo, textura, condutividade elétrica), relevo entre outros. Segundo Molin (2001), os mapas de produtividade também são informações importantes que podem expressar a variabilidade espacial intrínseca da área e, portanto serem utilizados na delimitação das UGD.

Para Rodrigues e Zimback (2002) e Bazzi et al. (2012a), uma vez demarcadas, as UGDs são uma alternativa para viabilizar a AP economicamente, funcionando como unidades de operação para aplicação localizada de insumos e como indicador para amostragem do solo e da cultura. Segundo Alba et al. (2012), a definição de UGD é fundamental para a adoção da AP, pois permite reduzir os custos das operações de campo e otimizar a gestão do empreendimento. Além disto, podem ser definidas por diversos métodos. Bazzi et al. (2012b) comentaram o uso de informações como produtividade, condutividade elétrica, declividade e textura do solo como atributos utilizados na definição de UGD.

### **2.4 Geoestatística**

O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo tem uma elevada importância no refinamento das práticas de manejo e planejamento agrícola sustentável (CAMBARDELLA et al., 1994; SOUZA et al., 2003; CORÁ et al., 2004), o que permite mensurar sobre a variabilidade espacial existente no solo e a

dependência espacial entre as amostras, e a mesma pode ser modelada e ajustada por meio da análise geoestatística (MULLA et al., 1992; WEBSTER, 2000).

A geoestatística é minuciada como a aplicação dos estudos das variáveis regionalizadas ou variáveis com dependência espacial (MATHERON, 1962). Ela permite entender a aparente aleatoriedade dos dados contudo, com uma provável composição espacial, fornecendo uma função de correlação espacial (LANDIM, 2010).

O semivariograma é uma sentença gráfica que demonstra a variação de uma ocorrência regionalizada no espaço medindo suas relações estatísticas (ANDRIOTTI, 1989; CAMARGO, 2014).

A distribuição das variáveis aleatórias  $Z(x)$  e  $Z(x + h)$  é demonstrada pelo semivariograma. Relembrando a condição de estacionaridade, temos que a utilização do semivariograma exige que pelo menos a hipótese intrínseca seja atendida, ou seja, exige a condição de estacionaridade mais fraca quando comparada com a autocorrelação (GUIMARÃES, 2004). Esta hipótese é a mais utilizada por ser menos restritiva (FERRAZ, 2012).

O semivariograma é uma ferramenta de suporte às técnicas de krigagem, pois permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (DRUCK et al., 2004; MOLIN et al., 2015). Segundo Oliver (2013), o semivariograma é a ferramenta primordial da geoestatística, pois indica a forma de variação de uma determinada propriedade para outro lugar. O gráfico que reproduz a existência ou não de dependência espacial de uma variável qualquer em estudo é denominado semivariograma. Ele pode ser representado analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela equação 1.

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

Em que,

$\gamma^*(h)$  = Semivariograma estimado;

$Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$  = são valores de  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $x_i$  e  $x_i+h$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), separados pelo vetor  $h$ ;

$N(h)$  = é o número de pares de pontos formados para uma dada distância  $h$ ;

Analisando a função do semivariograma (Equação 1), observa-se que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e,

portanto, menor a semivariância; e quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a dispersão (variância). Na teoria, tem-se que para a distância  $h=0$  a semivariância  $g(0) = 0$  e, a semivariância  $g(h)$  cresce com o incremento de  $h$ , até atingir um valor constante para  $g(h)$  que corresponde às variações aleatórias, ou seja, variações que não são justificadas pela semelhança de um ponto com outro (VIEIRA, 2000).

Após a modelagem do semivariograma, três componentes são definidos e serão utilizados para o cálculo da krigagem: efeito pepita ( $C_0$ ), alcance ( $a$ ) e patamar ( $C_0+C$ ). A correta determinação destes componentes é importante para que represente da melhor forma o ajuste da variável estudada e a interpolação por krigagem (VIEIRA, 2000).

O alcance de dependência espacial indica a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente, sendo de grande relevância para o planejamento e avaliação experimental, podendo auxiliar na definição de procedimentos amostrais (WEBSTER, 1985). O alcance reflete o grau de homogeneização de uma determinada variável em estudo; quanto menor for o alcance, maior será a variabilidade a curtas distancias e maior deve ser a densidade e proximidade entre as amostras.

O patamar são ajustes que representam a estacionaridade de segunda ordem, ou seja, a partir da distância determinada pelo alcance, a semivariância não aumenta com o distanciamento entre pontos e se estabiliza dando origem ao alcance, sendo assim, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, demonstrando que os dados estão distribuídos de forma aleatória (CAMARGO, 2014).

O efeito pepita ( $C_0$ ) teoricamente deveria ser nulo em sua origem, no entanto, na maioria das vezes ele apresenta uma descontinuidade do semivariograma no eixo das ordenadas para distâncias menores do que a menor distância de separação entre as observações (CAMARGO, 2014). Ele é definido como sendo a variância não explicada ao acaso, pois na teoria deveriam apresentar o mesmo valor. No entanto, parte destes erros descontínuos estão em virtudes das mensurações entre pontos bem como erros amostrais causados em laboratórios, imprecisões nas coletas dos dados e até erro no posicionamento das amostras, principalmente na exatidão do GNSS.

## **2.5 Krigagem Ordinária**

O método geoestatístico, cognominado krigagem, é uma técnica de aferição de valores de variáveis distribuídas no espaço ou tempo. Progressista por Matheron, em meados dos anos 60, auferiu o nome de krigagem em homenagem ao Engenheiro sul-africano D. G. krige, em 1951, que foi o pioneiro nesta técnica (KRIGE, 1951).

Tal técnica baseia-se no estudo da variabilidade espacial, sendo conhecido seu semivariograma e havendo dependência entre as amostras, pode-se interpolar valores não amostrados em qualquer posição dentro do campo de estudo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000). Segundo Molin et al (2015), a krigagem ordinária, é a forma mais utilizada, pois este método além de ser flexível ao uso, prioriza a estrutura da dependência espacial, sendo que assume-se o efeito da não existência de tendência nos dados presentes, sendo assim, é imprescindível o tratamento de tal efeito, assumindo assim a hipótese de estacionariedade. 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 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Local**

O trabalho foi realizado no ano de 2015, na Fazenda Santa Hilda no município de Dourados, MS. O local situa-se em latitude de 22°17'S, longitude de 54°91'W e altitude de 460 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2009).

Utilizou-se uma área de 126 ha (Figura 1) em sistema de semeadura direta, sendo esta conduzida por vinte anos, tendo como culturas de verão soja e, no inverno, milho, em um sistema de sucessão de culturas sem revolvimento do solo; nela foi gerada uma malha amostral com 126 pontos distribuídos regularmente.

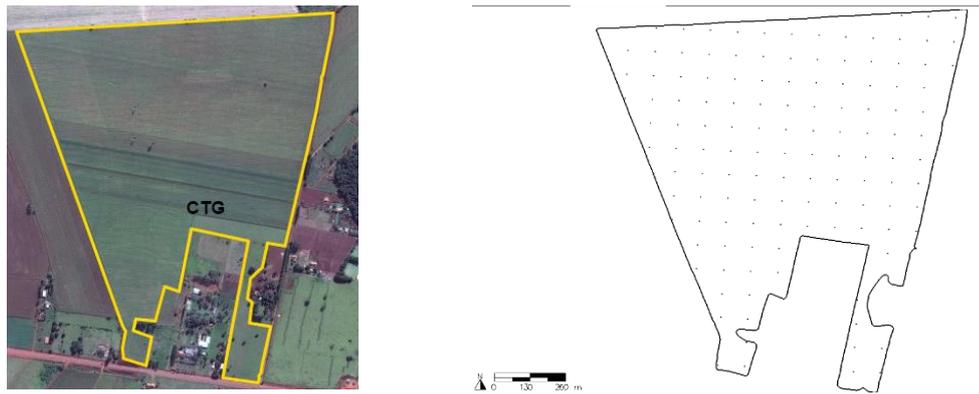


Figura 1. Área e grade amostral utilizada na coleta de dados

## 3.2 Atributos avaliados

### 3.2.1 Resistência mecânica à penetração e teor de água do solo

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi determinada utilizando-se um penetrômetro da marca Falker, modelo SoloStar PLG5500, montado em um quadriciclo, marca Honda, modelo Fourtrax TRX420FM. O penetrômetro eletrônico é equipado com haste com cone tipo 2, com resolução de coleta de 10 mm.

O coletor de dados e sistema de navegação em campo utilizado foi do modelo FBX3050, da empresa Falker Automação Agrícola (FALKER, 2013b), que serviu para geração do contorno da área, confecção da grade amostral e navegação para a coleta de dados com o conjunto.

Os dados de RP foram coletados até a profundidade de 0,40 m, sendo avaliados a cada 0,10 m, ou seja, as profundidades de avaliação foram: 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m, além da RMSP média do perfil, a RMSP máxima do perfil e a profundidade da RMSP máxima e por consequência, possibilitando a recomendação de escarificação/subsolagem. A cada ponto amostrado foram realizadas três replicações de RMSP em um raio de 5 m do ponto marcado para coleta no sistema. Simultaneamente à leitura do penetrômetro, foram retiradas amostras de solo nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m de profundidade, para determinar, pelo método gravimétrico proposto por Kiehl (1979), o teor de água do solo após secagem em estufa, por 24 h a 105 °C (Equação 2).

$$\text{TMA} = \frac{(\text{MI} - \text{MII})}{(\text{MII} - \text{TA})} \times 100 \quad (2)$$

Em que: TMA: teor médio de água no solo em %; MI: massa úmida de solo mais o peso da lata (g); MII: massa seca de solo mais o peso da lata (g); e TA: peso da lata em (g). Os dados do TMA estão apresentados no Quadro 01.

QUADRO 1. Dados referentes ao teor de água no solo no momento da coleta da resistência à penetração do solo.

Camadas (m)	TMA do solo (%)
0,00-0,10	25,4
0,10-0,20	21,7
0,20-0,30	24,5
0,30-0,40	25,8

### 3.2.2 Atributos químicos e granulometria do solo

Para análise dos atributos químicos e granulométricos do solo foram coletadas amostras nas profundidades de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, sendo que em cada ponto foram coletadas aleatoriamente, em um raio de 3 m, 8 sub-amostras, para compor uma amostra composta representativa do ponto de amostragem. Os atributos químicos avaliados foram: pH, potássio (K, mg dm<sup>-3</sup>), fósforo (P, mg dm<sup>-3</sup>), cálcio (Ca, cmolc dm<sup>-3</sup>), magnésio (Mg, cmolc dm<sup>-3</sup>), acidez potencial (H+Al, cmolc dm<sup>-3</sup>), matéria orgânica (MO, g dm<sup>-3</sup>), e granulometria do solo (areia, silte e argila, g kg<sup>-1</sup>), sendo que, para a análise granulométrica foi realizada em 60 pontos amostrais, nas duas profundidades. Foram calculados a capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (SB).

Após a realização das análises químicas do solo, foram gerados mapas de cada variável em cada profundidade avaliada, conforme metodologia de classificação (baixo, médio e alto) proposta por Ribeiro. et al (1999).

### 3.2.3 Produtividade de grãos

A produtividade foi obtida por meio do monitor GreenStar 3 2630 da colhedora 9470 STS da marca John Deere. Os dados foram importados do monitor para o software de computador (Apex) para geração de relatórios e verificação do trabalho. O monitor de colheita presente na colhedora obtém as leituras da produtividade e teor

de água do grão por meio de sensores instalados, sendo que a medição do fluxo de grãos é realizada por um sensor de impacto.

Foram utilizados os dados de produtividade para as safras de soja 2014/2015, milho de 2015 e milho de 2016, sendo apresentados os mapas compostos das médias das duas safras de milho em kg ha<sup>-1</sup>. Para se obter a camada normalizada da produtividade das safras, utilizou-se a opção de composição média, criando-se um mapa composto pelo cálculo da média das camadas do mapa selecionadas do mesmo tipo de cultura (DEERE & COMPANY, 2016). A normalização dos dados foi obtida de acordo com a equação 3.

$$VN = \frac{(V - X)}{DP} \quad (3)$$

Em que,

VN – valor normalizado, adimensional.

V – valor da produtividade no ponto (kg.ha<sup>-1</sup>).

X – média da produtividade na área (kg.ha<sup>-1</sup>).

DP – desvio padrão da produtividade (kg.ha<sup>-1</sup>).

### 3.3 Análise dos dados

Foi efetuada a estatística descritiva dos atributos afim de se identificar valores anômalos e outliers através dos histogramas e box-plot, caracterizar as tendências de posições centrais e de dispersão dos dados, além de expressar melhor a sua distribuição. Foram estimadas as seguintes medidas: de posição (média, mediana, máximo e mínimo), de dispersão (desvio-padrão e coeficiente de variação) e a forma da dispersão (assimetria e curtose). Para a interpretação do coeficiente de variação (CV %), considerou a classificação de Warrick e Nielsen (1998) como baixo, se menor que 15%; médio, entre 15 e 50% e alto acima de 50%. O ajuste à distribuição normal foi verificado pelo Teste Ryan-Joiner a 5% de probabilidade.

A geoestatística foi utilizada para analisar e quantificar a existência de dependência espacial dos atributos químicos e físicos. O ajuste do modelo matemático para os semivariogramas de cada variável forneceu os parâmetros Efeito Pepita (C0), Patamar (C0 + C) e Alcance (A). O efeito pepita é o valor da semivariância para distância zero e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor

constante; o alcance é à distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (VIEIRA et al., 1983). A seleção dos modelos foi realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo (SQR) e melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

A classificação do índice de dependência espacial (IDE) foi realizada com base na razão entre o efeito pepita e o patamar ( $C_0/C_0 + C$ ), sendo considerada forte para IDE inferior a 25%, moderada para IDE entre 25 e 75 % e fraca para IDE superior a 75 % (CAMBARDELLA et al., 1994).

A predição dos valores químicos para os locais não amostrados foi realizada por interpolação dos valores de 126 pontos amostrados, e os atributos físicos sendo interpolados por apenas 60 pontos, pelo método de krigagem ordinária.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resistência mecânica do solo à penetração

Observou-se que a área apresenta um pequeno aumento da RMSP na profundidade de 0,0-0,10 m para 0,10-0,20 m, passando de 1,17 para 2,29 MPa e para a RMSP máxima, obtendo um valor de 3,15 MPa respectivamente (Quadro 4), podendo a mesma estar relacionada com o teor de água no solo. Borges et al. (2004) descrevem que a partir de 40 cm em sistema de semeadura direta (SSD), tal crescimento da RMSP nas camadas mais profundas é apropriado, entre outros motivos, à pressão das camadas superficiais sobre as subjacentes e à própria pressão exercida pelas máquinas utilizadas nas operações de preparo do solo, que se transmite em profundidade.

Entretanto, a partir da camada 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, houve um decréscimo da RMSP, passando de 2,28 a 1,93 MPa respectivamente. Tal decréscimo é decorrente do manejo adotado na área. Por ser um sistema de Semeadura Direta (SSD), os níveis de compactação encontram-se nas camadas intermediárias com decréscimos acentuados nas camadas mais profundas.

Tomando como base os dados obtidos pela Falker (FALKER, 2010) para analisar a RMSP em um solo com teor de argila acima de 50%, estabeleceu-se a seguinte classificação para os valores de RMSP: baixo - 0 a 2,5 MPa; médio - 2,5 a 3,5 MPa; alto - 3,5 a 4 MPa e muito alto - acima de 4 MPa. Observou-se valores

baixos de RMSP nas profundidades 0,0-0,010 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e na variável média total da RMSP máxima. Isto indica que nestas camadas há implicações no crescimento do sistema radicular da planta; entretanto a RMSP máxima apresenta-se como média, o que poderá causar problemas no crescimento do sistema radicular, acarretando em menor crescimento e alteração morfológica da planta.

QUADRO 4. Estatística descritiva da resistência do solo à penetração (MPa) nas profundidades avaliadas.

Parâmetros	Camadas avaliadas (m)						
	0,00 a 0,10	0,10 a 0,20	0,20 a 0,30	0,30 a 0,40	RMSP Max (MPa)	Prof. RMSPMax (cm)	Média Total da RMSP Max. (MPa)
Média (MPa)	1,17	2,29	2,28	1,93	3,15	19,50	1,90
DP	0,45	0,45	0,35	0,39	0,59	5,98	0,29
Variância	0,19	0,20	0,13	0,15	0,36	35,82	0,086
Mínimo	0,25	1,19	1,50	1,34	1,82	6,33	1,18
Máximo	2,59	3,75	3,61	3,75	5,11	36,33	2,98
CV (%)	37,98	19,58	15,50	20,21	19,05	30,71	15,45
As	0,49	0,23	1,07	1,66	0,79	0,54	0,63
Curtose (k)	0,42	0,88	2,04	4,42	0,83	0,33	1,77
RJ	0,98	0,99	0,96	0,93	0,97	0,98	0,98
Probabilidade	0,027	>0,10*	<0,01 <sup>NS</sup>	<0,01 <sup>NS</sup>	<0,01 <sup>NS</sup>	0,049 <sup>NS</sup>	<0,01 <sup>NS</sup>

\*: distribuição normal pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). <sup>NS</sup>: distribuição não significativa pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). CV: coeficiente de variação. DP: desvio padrão. As: Assimetria. RJ: Ryan-Joiner. RMSP Máx: resistência mecânica do solo a penetração máxima. Prof. RMSP Máx: profundidade da resistência mecânica do solo a penetração máxima.

Observa-se a existência de valores médios, de acordo com a classificação adotada, em todas as profundidades avaliadas. Porém, os valores máximos indicam que pode haver uma limitação física ao crescimento do sistema radicular das culturas, e que um manejo adequado deve ser realizado dentro da área de estudo, pois existem indícios de pontos médios de RMSP presentes e que podem acarretar em problemas futuros com o possível aumento do índice de compactação e perda de produtividade. Estes resultados demonstram que a tomada de decisão quanto ao manejo baseado em valores médios provoca em erros superestimados, o que ocasiona em tomadas de decisões errôneas quanto ao manejo do solo na área, sendo assim, a necessidade do conhecimento do padrão de distribuição espacial da RMSP para o manejo adequado da área.

Analisando o conjunto de dados da RMSP, além das amplitudes consideráveis, os coeficientes de variação (CV%) da RMSP, em ambas as profundidades, variaram

de 37,98 a 15,45 % (Quadro 4), situando-se na classe de média variabilidade, segundo Warrick & Nielsen (1998).

Os valores observados de assimetria e curtose sugerem que os dados não apresentam distribuição normal para as camadas 0,20-0,30m; 0,30-0,40 m e para as variáveis RMSP máxima e Média total da RMSP máxima, realizado pelo Teste Ryan-Joiner a 5% de probabilidade (Quadro 4). As demais profundidades e variáveis apresentaram distribuição normal significativa, explicadas pelos valores de média e mediana, concordando com os valores encontrados por Bottega et al. (2011) que avaliaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico.

Os dados da RMSP apresentaram dependência espacial expressa pelo ajuste dos semivariogramas experimentais aos modelos esférico e exponencial (Quadro 5), conforme encontrado também em outros resultados de pesquisas que indicam estes modelos como os de maior ocorrência para atributos do solo (CRUZ et al., 2010; CAMPOS et al., 2012; NETO et al., 2015).

Em trabalho realizado por Coelho et al. (2012) em um Vertissolo Háplico no semiárido nordestino, foi ajustado aos dados de RMSP o modelo esférico nas profundidades 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, o que indica que, ao modelar a dependência espacial da RMSP em vários tipos de solo, o ajuste ao semivariograma depende do tipo de solo e sua mineralogia.

A escolha dos modelos teóricos se deu pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela soma do quadrado dos resíduos (SQR), ou seja, quanto maior o coeficiente de determinação e menor a soma do quadrado dos resíduos, mais preciso será o ajuste dos dados. Todas as variáveis analisadas apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70 (Quadro 5), ou seja, no mínimo 70% da variabilidade existente nos valores da semivariâncias estimadas são explicados pelos modelos ajustados (CAMPOS et al., 2007; CAMPOS et al., 2012).

QUADRO 5. Dados da análise geoestatística para resistência mecânica do solo à penetração nas profundidades avaliadas.

Parâmetros	Camadas (m)				RMSP Max (MPa)	Prof. RMSP Max (cm)	Média Total (MPa)
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4			
Semivariograma							
Modelo	Esf.	Exp.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.
Co	0,052	0,063	0,021	0,027	0,068	6,33	0,021
Co+C	0,21	0,23	0,090	0,11	0,27	27,70	0,067
Alcance	153	65	147	160	156	150	65
R <sup>2</sup>	0,981	0,713	0,811	0,893	0,935	0,852	0,998
SQR	1,8x10 <sup>-6</sup>	3,9x10 <sup>-4</sup>	2,1x10 <sup>-5</sup>	2,5x10 <sup>-5</sup>	7,7x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-8</sup>	1x10 <sup>-7</sup>
Grau de dependência espacial (GDE)							
GDE	0,24	0,27	0,23	0,24	0,25	0,23	0,31
Classe	Forte	Mod	Forte	Forte	Forte	Forte	Mod

Co = efeito pepita; Co+C = patamar; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; SQR = soma dos quadrados dos desvios; GDE = grau da dependência espacial; Mod: Moderado; Esf: esférico; Exp: exponencial.

O alcance indica a distância (m) limite entre pontos correlacionados entre si. Pontos coletados a distâncias maiores que o alcance são independentes e, para sua análise, pode-se utilizar a estatística clássica (VIEIRA, 2000). O alcance nas profundidades estudadas variou de 65 a 160 m para as profundidades de 0,10-0,20 m e 0,30-0,40 m respectivamente.

O efeito pepita (Co), representa a variabilidade não explicada ao acaso, considerando a distância de amostragem utilizada. Na análise do índice de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994). Observou-se que as variáveis que apresentaram um forte índice de dependência espacial foram a RMSP nas camadas 0,0-0,10 m; 0,20-0,30 m; 0,30-0,40 m, RMSP máxima e a variável Profundidade da RMSP máxima; as demais apresentaram GDE moderado (Quadro 5).

A partir dos valores estimados, foram gerados mapas de distribuição espacial da resistência à penetração do solo, por Krigagem ordinária, por meio da interpolação das informações geradas pelo semivariograma (Figura 2).

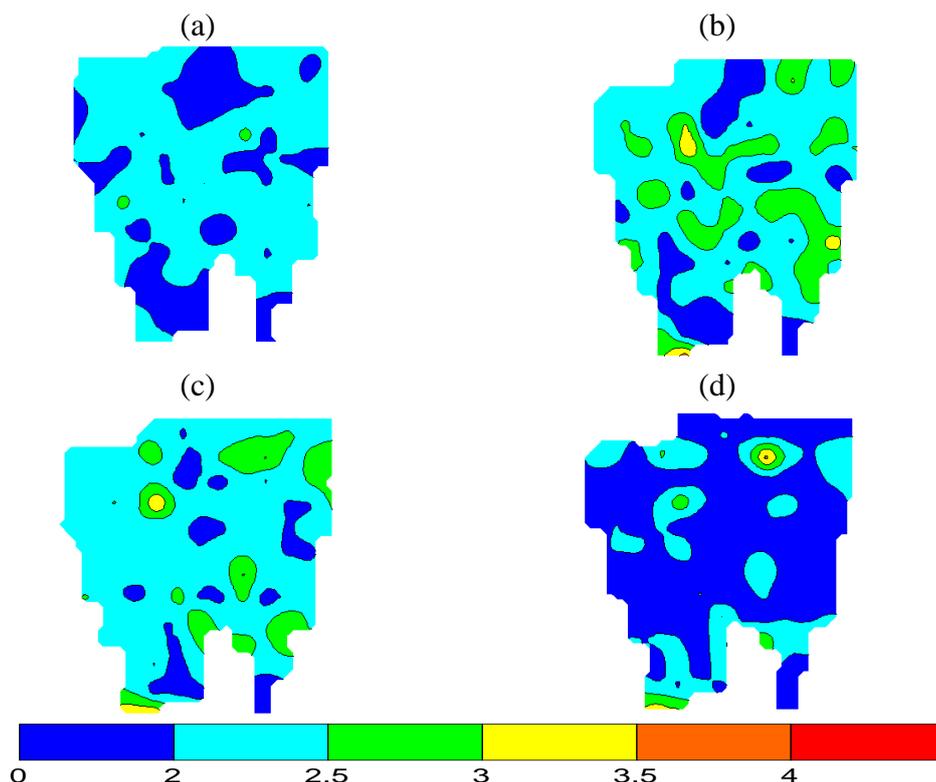


Figura 2. Mapas para resistência do solo a penetração (MPa) nas profundidades avaliadas: (a) 0,00 -0,10 m; (b) 0,10 - 0,20 m; (c) 0,20 - 0,30 m; (d) 0,30 - 0,40 m.

Observa-se que na profundidade 0,0-0,10 m e 0,30 - 0,40 m a resistência mecânica do solo à penetração esteve abaixo de 2,5 MPa em grande parte da área, indicando que não há problemas de compactação nas mesmas. Na profundidade 0,30-0,40 m, encontra-se um pequeno percentual acima de 2,5 Mpa.

Observando os mapas de isolinhas da RMSP (Figura 2), constata-se que os maiores valores são encontrados nas profundidades 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c). O aumento da RMSP nas profundidades intermediária pode ter ocorrido devido à trafegabilidade da colhedora no momento da colheita, causando compactação do solo, bem como um efeito acumulativo de anos de uso de maquinários agrícolas.

Existem zonas na área em que a RMSP atingiu valores restritivos ao crescimento radicular para solos argilosos nas profundidades intermediárias, variando de 1,9 a 3,3 MPa. Geralmente, em áreas em que se aplica o sistema de semeadura direta (SSD), comumente verifica-se que os maiores valores de compactação encontram-se nas camadas intermediárias.

O acompanhamento por safra deve ser constante, pois o índice de RMSP pode aumentar, podendo acarretar em problemas maiores em outras safras. Sendo assim, foi elaborado mapas de recomendações de escarificação/subsolagem, para minimizar

os efeitos da RMSP no solo de acordo com os limites proposto (Figura 3). Na área com a coloração amarelada (Figura 3b), a RMSP encontra-se acima de 3,0 MPa com nível médio de compactação, e uma pequena proporção superior a 4 MPa, o que indica que grande parte da área está comprometendo o crescimento do sistema radicular da cultura. Na necessidade de realizar algum tipo de revolvimento de camadas compactadas, verifica-se que a maior parte da área está com os maiores valores de RMSP até 0,30 m de profundidade (Figura 3c).

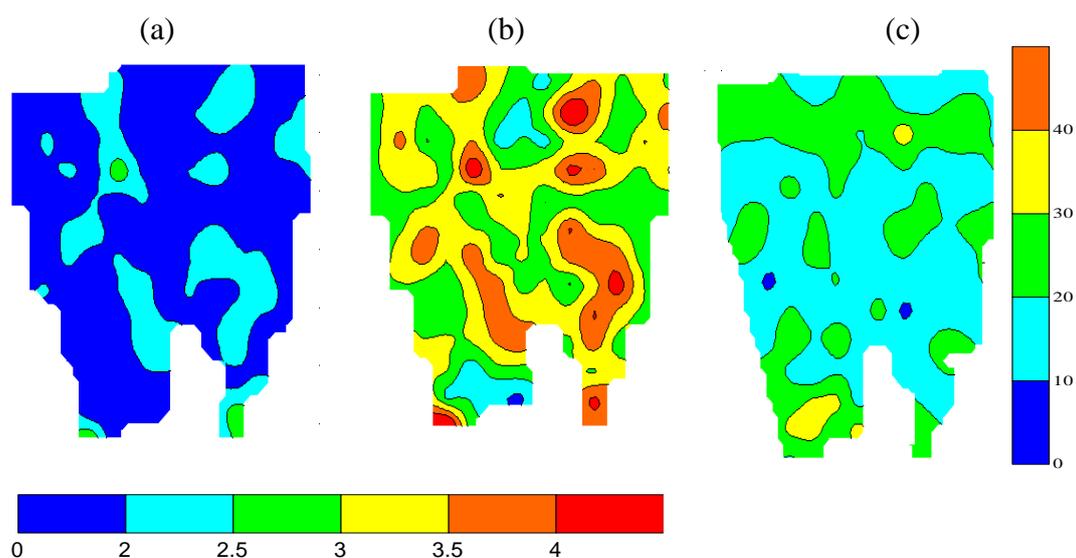


Figura 3. Mapas da resistência média do perfil (a), da resistência máxima no perfil(b), e da profundidade (cm) da máxima resistência (c).

## 4.2 Granulometria e atributos químicos do solo

### 4.2.1 Granulometria do solo

As médias da análise granulométrica indicam predominância argilosa nas duas profundidades avaliadas, 55,62 % (0,0-0,10 m) e 60,39 % (0,10-0,20 m), sendo aspecto típico do solo da região da grande Dourados (Quadro 6).

De acordo com os valores de assimetria e curtose, os dados seguem uma distribuição próxima a normal, sendo que valores próximos de zero indicam uma tendência dos dados a normalidade. Os valores de assimetria encontram-se distantes de zero para a variável argila (assimétrica a esquerda), silte e areia (assimétrico a direita).

QUADRO 6. Estatística descritiva para os atributos granulométricos do solo.

Parâmetros	Atributos					
	Areia%		Silte%		Argila%	
	0-0,10	0,10-0,20	0-0,10	0,10-0,20	0-0,10	0,10-0,20
Média	16,42	16,20	22,03	22,35	55,62	60,39
DP	4,05	3,69	6,87	9,62	12,18	9,65
Variância	16,43	13,62	47,16	92,49	148,26	93,16
Mínimo	6,97	8,61	6,48	7,25	21,63	35,80
Máximo	26,85	23,01	38,85	48,43	75,32	68,86
CV (%)	24,68	22,78	31,17	43,03	21,89	15,98
As	0,20	0,08	0,60	1,31	-0,81	-1,49
Curtose (k)	0,39	-0,94	1,13	1,08	-0,25	0,97
RJ	0,98	0,98	0,96	0,92	0,95	0,88
Probabilidade	>0,10*	>0,10*	0,053	<0,10 <sup>NS</sup>	<0,10 <sup>NS</sup>	<0,10 <sup>NS</sup>

\*: distribuição normal pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). <sup>NS</sup>: distribuição não significativa pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). CV.: coeficiente de variação. DP: desvio padrão. As: Assimetria. RJ: Ryan-Joiner

Observou-se um CV de 24,68% e 22,78% nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m respectivamente para areia, 31,17% e 43,03% nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m para silte, e 21,89% e 15,98% nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m para argila respectivamente, o que nos indica que os atributos granulométricos apresentam uma variabilidade classificada como média (WARRICK & NIELSEN, 1998).

Aos atributos granulométricos, obteve-se os valores de  $p > 0,05$  para areia nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, considerado portanto significativo, e  $p < 0,05$  para o atributo silte na camada 0,10-0,20 m, e para argila nas camadas 0,0-0,10 m respectivamente, sendo classificado como não significativo (Quadro 6).

Os modelos dos semivariogramas (Quadro 7) que se ajustaram aos atributos granulométricos foi o exponencial para silte e argila, na profundidade 0,0-0,10 m, enquanto o modelo esférico foi ajustado aos dados das demais variáveis e profundidades. O menor alcance foi observado para a areia na profundidade de 0,0-0,10 m, e o maior alcance para a argila, na profundidade 0,10-0,20 m.

Segundo McBratney & Webster (1983), o conhecimento do alcance é importante na definição da ótima intensidade de amostragem, visando a reduzir o erro-padrão da média, além de aumentar a representatividade da amostra. Para Montanari et al. (2005), o número de amostras varia segundo o relevo. No entanto, o número de amostragens para os atributos granulométricos do solo devem ser reduzidas devido à amplitude dos alcances encontrados.

QUADRO 7. Dados do semivariograma para os atributos granulométricos do solo.

Parâmetros	Atributos					
	Areia		Silte		Argila	
	0-0,10	0,10-0,20	0-0,10	0,10-0,20	0-0,10	0,10-0,20
	Semivariograma					
Modelo	Esf	Esf	Exp	Esf	Exp	Esf
Co	0,0100	1,500	25,00	6,500	16,50	11,900
Co+C	14,1200	22,990	77,08	155,20	59,55	169,60
Alcance	1057,0	1615,0	1299,0	2588,0	1874,0	2663,0
R <sup>2</sup>	0,998	0,925	0,845	0,958	0,877	0,963
SQR	1,18	19,4	49,7	3,26	78,6	65,6
GDE	7E <sup>-4</sup>	0,65	0,32	0,42	0,27	0,70
Classe	Forte	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada

Co = efeito pepita; Co+C = patamar; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; SQR = soma do quadrado dos resíduos; GDE = grau de dependência espacial.

Analisando-se os mapas da granulometria do solo (Figura 4), observa-se que o teor de argila varia de 350 g kg<sup>-1</sup> até 600 g kg<sup>-1</sup> nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m respectivamente, índice muito acima das análises obtidas referentes às texturas areia e silte nesta mesma profundidade.

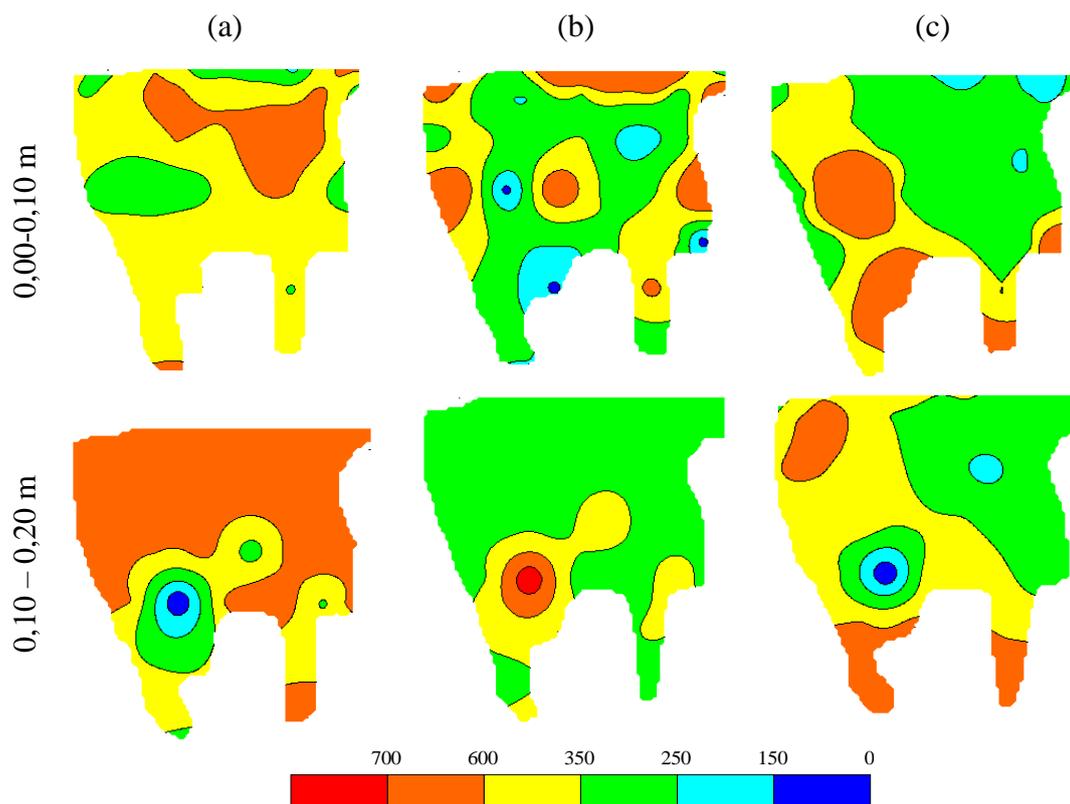


Figura 4. Mapas da granulometria do solo (g kg<sup>-1</sup>). (a) – argila, (b) – silte, (c) – areia.

Na profundidade de 0,10-0,20 m, o valor da textura argilosa continua destacando-se em grandes proporções, porém não há predominância como na camada

0,00-0,10 m, pois o silte aparece em quantidade considerável. O silte indicou percentuais elevados onde apresentou na maior parte da camada 0,0-0,10 m valores entre 150,00 e 600,00 g kg<sup>-1</sup>.

#### 4.2.2 Atributos químicos do solo

Todos os atributos químicos, com exceção do pH, nas duas profundidades avaliadas, encontram-se em níveis elevados no solo (Quadro 8), conforme a classificação adotada (RIBEIRO et al., 1999). Os valores do pH encontram-se entre 4,82 e 6,55 na profundidade 0,0-0,10 m e 4,75 a 6,61 para a profundidade 0,10-0,20 m respectivamente (Quadro 8) o que, segundo (SOUZA & LOBATO 2004), indica que em alguns locais da área a acidez pode ser considerada baixa e elevada. Analisando a média da área, entretanto, observa-se que a acidez é classificada como média para ambas profundidades.

Os valores médios de, P (mg dm<sup>-3</sup>), K (cmolc dm<sup>-3</sup>), Ca (cmolc dm<sup>-3</sup>), Mg (cmolc dm<sup>-3</sup>), H+Al (cmolc dm<sup>-3</sup>), SB (cmolc dm<sup>-3</sup>), CTC (cmolc dm<sup>-3</sup>), V% (%) e MO (%) no solo encontram-se altos, porém os valores máximos e mínimos são classificados como muito alto e muito baixo para as duas profundidades analisadas (Quadro 8). Mesmo considerando-se a amplitude entre valores máximos e mínimos, os demais indicadores da fertilidade do solo encontram-se de médios a altos, provavelmente decorrente da elevada utilização de insumos. Entretanto, os dados sugerem que um estudo detalhado da fertilidade na área poderá proporcionar uma redução na aplicação de fertilizantes em alguns pontos, onde o nível já está alto ou muito alto.

Na profundidade de 0,0-0,10 m, a variável matéria orgânica (MO) e V% apresentaram baixa variabilidade com um CV% < 15; os demais atributos químicos, com exceção do K e H+Al que apresentaram variabilidade alta CV% > 50, tiveram suas variáveis classificadas como média (CV% entre 15 e 50). Na profundidade de 0,10-0,20 m, as mesmas variáveis apresentaram as mesmas características quanto ao coeficiente de variação. Segundo Silva e Chaves (2001), tais variações dos atributos químicos do solo estão correlacionadas a alterações provocadas pelas adubações e calagens sucessivas e irregulares.

---

#### QUADRO 8. Estatística descritiva para os atributos químicos do solo

---

Atributos do solo

---

Parâmetros	pH CaCl <sub>2</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V%
<b>Camada 0,00-0,10 m</b>										
Média	5,2	3,8	57	1,35	7,5	2,4	3,9	11,7	15,6	75,7
DP	0,8	0,4	25	0,92	1,5	0,5	2,6	2,7	3,6	10,18
Variância	0,8	0,2	629	0,85	2,3	0,3	7,1	7,3	13,4	103,7
Mínimo	4,8	2,6	7,2	0,26	4,3	1,1	0,9	7	9,2	26,0
Máximo	6,5	4,8	145	6,12	10	3,6	25	19,6	34,6	92,6
CV (%)	17	11	44	68	20	21	68	23	23,4	13,4
As	0,1	-0,1	0,7	2	0,1	-0,04	4,5	0,8	1,3	-1,5
Curtose (k)	-0,6	-0,1	0,9	6,19	-0,7	-0,5	32,6	0,4	4,1	4,03
RJ	0,98	0,99	0,9	0,87	0,99	0,98	0,8	0,9	0,98	0,97
Probabilidade	>0,10*	>0,10*	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>	>0,10*	>0,10*	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>	0,048	<0,01 <sup>ns</sup>
<b>Camada 0,10-0,20 m</b>										
Média	5,1	3,76	55,6	1,21	7,47	2,34	4,37	11,05	15,43	72,90
DP	0,90	0,46	27,2	0,91	1,51	0,47	3,41	2,30	4,05	10,97
Variância	0,82	0,21	738,8	0,83	2,27	0,22	11,68	5,29	16,40	120,4
Mínimo	4,75	2,44	5,29	0,25	3,36	1,07	0,59	6,78	9,80	26,32
Máximo	6,61	5,08	144,2	6,63	11,62	3,34	35,19	19,11	47,77	94,76
CV (%)	18,97	12,32	48,85	75,02	20,37	20,10	78,16	20,80	26,25	15,05
As	0,42	0,20	0,87	2,46	0,18	-0,28	5,99	0,81	4,22	-1,04
Curtose (k)	-0,24	0,64	0,76	9,07	-0,12	-0,50	50,27	1,19	30,29	2,60
RJ	0,99	0,99	0,97	0,85	0,99	0,99	0,72	0,98	0,83	0,97
Probabilidade	>0,10*	>0,10*	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>	>0,10*	>0,10*	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>	<0,01 <sup>ns</sup>

\*: distribuição significativa pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). <sup>ns</sup>: distribuição não significativa pelo teste de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk). CV.: coeficiente de variação. DP: desvio padrão. As: Assimetria. RJ: Ryan-Joiner

De acordo com Artur et al. (2014), os elevados valores de CV verificados para os atributos K e H+Al em ambas profundidades, sugerem alta heterogeneidade em torno da média na área em estudo. Tal heterogeneidade pode ter várias causas presentes, dentre as quais merecem destaque: processos de formação do solo, acúmulo e distribuição das partículas do solo em função da forma do relevo (convexo, retilíneo e côncavo) e do fluxo de água na área. Além disso, segundo Carvalho et al. (2003), os resultados de análises de atributos do solo costumam apresentar valores altos de coeficiente de variação. De acordo com Cavalcante et al. (2007), o alto valor de CV% para os atributos químicos K e H+Al do solo é provavelmente devido aos efeitos residuais de adubações anteriores, visto que geralmente a adubação ocorre na linha de plantio, enquanto a correção da acidez do solo, bem como a deposição dos restos culturais, é realizada a lanço, não ocorrendo homogeneização sobre a área. Segundo Silva et al. (2003), mesmo as aplicações a lanço, seguidas de revolvimento do solo para incorporação do calcário, geram variabilidade no solo.

Apesar dos resultados elevados, os valores da amplitude dos teores mínimos e máximos do solo, podem ser explicados pelo sistema de manejo adotado dentro da propriedade (BOTTEGA et al., 2013). Alguns pesquisadores enfatizam que o sistema de semeadura direta (SSD), quando associado à rotação de culturas anuais, altera as propriedades químicas do solo, com aumento dos teores de matéria orgânica, variações no pH do solo, na capacidade de troca catiônica, bem como nas bases trocáveis e no fósforo disponível, melhorando as condições do solo (SILVEIRA; STONE, 2001; SOUZA ALVES, 2003). Ciotta et al. (2003), analisando os efeitos do acúmulo de matéria orgânica sobre a capacidade de troca de cátions de um solo com argila de baixa reatividade, concluíram que o acúmulo de matéria orgânica após 21 anos da adoção do SSD, em solo argiloso e com mineralogia oxídica, promoveu aumento expressivo na CTC do solo.

A análise descritiva dos dados tem a função de expressar o comportamento geral dos mesmos e identificar possíveis tendências que possa exercer qualquer influência na análise geoestatística, apesar de considerar esses dados espacialmente independentes (ZANÃO JÚNIOR et al., 2007). Com base no teste Ryan-Joiner a 5% de probabilidade, verificou-se que os atributos químicos pH, MO, Ca e Mg apresentaram distribuição normal nas duas profundidades. Os atributos P, K, H+Al, SB, CTC e V% não apresentaram distribuição normal. Outro indicativo da normalidade são os valores de coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero (Quadro 8).

A análise geoestatística mostrou que a variável CTC não ajustou-se a um modelo matemático teórico de semivariograma (Quadro 9), caracterizando efeito pepita puro, para a profundidade de 0,0-0,10 m. Já as demais variáveis, para ambas profundidades, ajustaram-se aos modelos teóricos esférico e exponencial.

Dalchiavon et al. (2012), estudando a dependência espacial dos atributos da fertilidade de um Latossolo distroférico, também ajustaram semivariogramas ao modelo esférico em 70% dos atributos avaliados, como P, Mg, MO, pH e m%. Motomiya et al. (2011) também obtiveram, estudando a variabilidade espacial dos atributos de um solo cultivado com algodão no Cerrado do Brasil, para os atributos químicos do solo, os melhores ajustes para os semivariogramas através do modelo esférico. No entanto, para o atual trabalho, o modelo esférico teve um percentual baixo com apenas 31,6 %, e o modelo exponencial com predominância maior, chegando um percentual de 68,4%.

Quando a variável estudada é independente espacialmente, o Co (efeito pepita) é igual a Co + C (patamar), conhecido como efeito pepita puro (epp). O epp indica distribuição casual, e pode ocorrer devido a erros de mensurações, de amostragem ou microvariação não-detectada, considerando ser o espaçamento de amostragem utilizado maior que o necessário para detectar dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; BOTTEGA et al., 2013), ressaltando que amostras em uma menor distância são mais semelhantes do que aquelas com distâncias maiores.

O menor alcance entre os pontos amostrais foi de 58 m para o atributo H+Al, e o maior foi de 4151 m para o atributo MO na profundidade 0,0-0,10 m. Na profundidade 0,10-0,20 m, o menor alcance encontrado foi para a soma de bases (SB) com 77 m, e o maior alcance para a MO de 4790 m respectivamente. O alcance evidencia a distância em que os pontos amostrais estão equiparados entre si, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance são mais homogêneos entre si (RESENDE et al., 2014).

Quadro 9. Dados do semivariograma para atributos químicos do solo.

pH	Profundidade (0,0 - 0,10 m)									
	Ph	P	K	Ca	Mg	M.O	H+Al	SB	CTC	V%
	Semivariograma									
Modelo	Esf	Exp	Exp	Exp	Exp	Esf	Exp	Esf	E.p.p	Esf
Co	0,51	183	0,42	1,5	0,085	0,10	0,99	1,83	-----	24,1
Co+C	2,72	526	0,83	4,84	0,27	0,57	3,33	6,94	-----	117,8
Alcance	2706	572	1628	91	80	4151	58	218	-----	193,0
R <sup>2</sup>	0,93	0,98	0,78	0,80	0,85	0,62	0,87	0,75	-----	0,916
SQR	0,07	52E-6	0,015	9E-03	1,7E-4	0,046	0,027	0,029	-----	6E-4
	Grau de dependência espacial (GDE)									
GDE	0,18	0,34	0,50	0,31	0,31	0,17	0,29	0,26	-----	0,20
Classe	Forte	Mod	Mod	Mod	Mod	Forte	Mod	Mod	-----	Forte
Parâmetros	Profundidade (0,10 - 0,20 m)									
	Ph	P	K	Ca	Mg	M.O	H+Al	SB	CTC	V%
	Semivariograma									
Modelo	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Esf	Exp	Esf	Esf	Exp.
Co	0,63	382	0,33	2,07	0,07	0,17	8,48	1,54	12,0	36,10
Co+C	1,43	915	0,65	4,84	0,23	0,61	19,22	5,16	24,1	122,6
Alcance	2185,0	1999,0	222,0	2565,0	91,0	4790,0	1655,0	77,0	2508	59,0
R <sup>2</sup>	0,94	0,88	0,94	0,84	0,81	0,74	0,92	0,43	0,92	0,36
SQR	3,E-03	3,8E7	2E-3	0,179	3,4E-4	4E-03	1,88	0,141	3,73	219
	Grau de dependência espacial (GDE)									
GDE	0,44	0,41	0,50	0,42	0,30	0,27	0,44	0,29	0,49	0,29
Classe	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod

Co = efeito pepita; Co+C = patamar; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; SQR = soma do quadrado dos resíduos; GDE = grau de dependência espacial; Mod = Moderado.

Observa-se que algumas variáveis apresentaram altos valores de efeito pepita (Co) nas duas profundidades (Quadro 9). Considera-se que quanto maior o efeito pepita (Co), maior será sua descontinuidade em toda área de estudo.

A melhor estimativa do semivariograma bem como o modelo escolhido, foi representado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela soma dos quadrados dos resíduos (SQR), ou seja, quanto maior o  $R^2$  e quanto menor a SQR, melhor será a modelagem do semivariograma.

Quanto ao grau de dependência espacial (GDE), proposto por Cambardella et al. (1994), observou-se dependência espacial forte para os atributos pH e MO na camada de 0,0-0,10 m ( $GDE < 25\%$ ); nesta mesma camada, os demais atributos apresentaram uma dependência espacial moderada ( $GDE \geq 25 \leq 75\%$ ), exceto a CTC que apresentou efeito pepita puro. Na camada 0,10-0,20 m, observou-se dependência espacial moderada para todos os atributos, sendo assim, os semivariogramas ajustados explicam grande parte da variância dos dados (Quadro 9).

A partir do ajuste dos semivariogramas foram construídos mapas por krigagem ordinária, importante para a agricultura de precisão pois a partir destes são definidas zonas específicas de manejo da fertilidade do solo possibilitando a aplicação de insumos com taxas variáveis (ZONTA, et al. 2014), diminuindo assim o custo de aplicação, bem como otimizando o manejo. O conhecimento da distribuição espacial e visualização das localizações das áreas nos mapas de isolinha são importantes para o planejamento da aplicação de insumos.

Com relação ao pH (Figura 5a), estes apresentaram maior heterogeneidade, com pH variando entre 4,82 e 6,55, sendo um pequeno percentual acima de 6 na profundidade 0,0-0,10 m, e na profundidade 0,10-0,20 m já observa-se valores semelhantes, variando de 4,75 a 6,61. De acordo com a classe de interpretação para o pH, observa-se que na camada 0,0-0,10 m, alguns pontos estão com acidez baixa ( $\leq 4,5$ ) variando de acidez média (5,1- 6) para ideal ou adequada (5,5-6,0) e alguns pontos com acidez fraca de acordo com a interpretação utilizada por Ribeiro et al. (1999). A faixa que corresponde de ideal a adequado na profundidade 0,0-0,10 m é onde encontra-se uma maior disponibilidade dos nutrientes absorvidos pelas plantas. Entretanto, na profundidade 0,0-0,10 m nota-se que o pH encontra-se com teores variando de adequados a limitantes, para obter uma maximização da capacidade produtiva, pois a acidez do solo em alguns locais pode estar afetando a ociosidade de

alguns elementos que encontram-se disponíveis no solo, sendo assim, a camada superficial é limitante para a correção no SPD.

Os teores de P encontram em quantidade excessiva no solo em ambas as profundidades avaliadas (Figura 5b). Segundo Ribeiro et al. (1999), o P é classificado como bom na faixa de (8,1-12,0 mg dm<sup>-3</sup>) e muito bom quando (>12 mg dm<sup>-3</sup>), sendo assim, observa-se que apesar do excesso, os níveis de P se apresentam adequados à obtenção de elevadas produtividades.

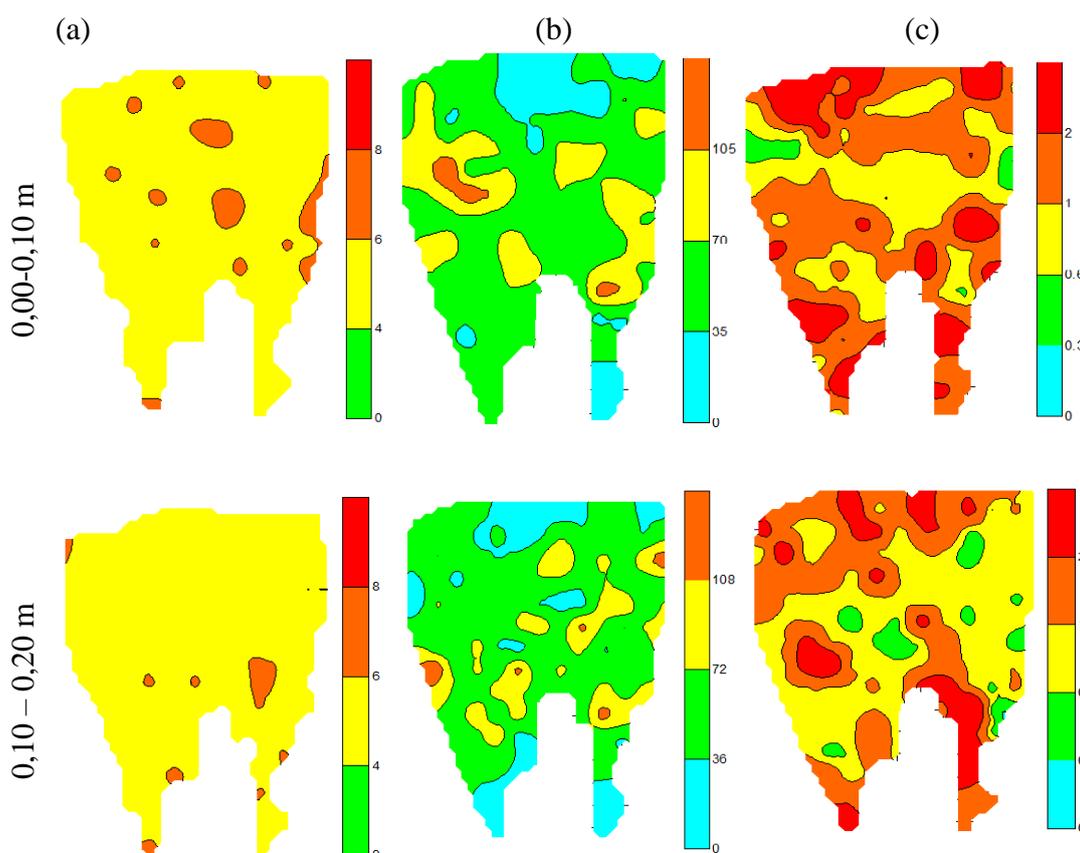


Figura 5. Mapas dos atributos químicos do solo. (a) – pH, (b) – fósforo (mg dm<sup>-3</sup>), (c) – potássio.

Observa-se que para ambas as profundidades, os teores de K encontram-se acima de 0,31 cmol dm<sup>-3</sup> (Figura 5c), os valores considerados altos, ou muito bons, por serem maiores que 0,31 cmol dm<sup>-3</sup>, de acordo com a classificação adotada segundo Ribeiro et al. (1999). O potássio (K) é um dos três nutrientes primários essenciais para as plantas, sendo sua função principal ligada ao metabolismo e vital para a fotossíntese. Tal nutriente é importante para a qualidade da cultura, melhorando sua eficiência em relação à água, aumentando sua resistência ao período

de inverno e até mesmo no controle de pragas e doenças, com um objetivo final de obter uma maior produtividade e grãos em ótimos estados ( PAVINATO et al., 2008).

Observou-se que 100% da área possui teor de Ca de 4,3 a 11  $\text{cmolc dm}^{-3}$  (Figura 6a), classificado como muito bom (RIBEIRO et al., 1999). O cálcio encontra-se como um cátion, e o mesmo é retido como  $\text{Ca}^{2++}$  trocável nas superfícies com cargas negativas das argilas e matéria orgânica do solo, sendo o cátion dominante na troca de cargas negativas (ALVAREZ et al., 1999).

O Magnésio (Mg) apresentou-se com percentuais elevados em toda área de estudo (Figura 6b). Segundo dados de Ribeiro et al. (1999), teores de magnésio  $> 0,91 \text{ cmolc dm}^{-3}$  são classificados como bom, ou seja, nas duas profundidades avaliadas, o magnésio foi expresso de maneira muito alta, variando em sua maioria de 3 a  $> 4 \text{ (cmolc dm}^{-3})$  em ambas profundidades avaliadas. Sua principal forma de acréscimo ao solo é por meio da aplicação de calcário, e de forma secundária em composição com fertilizantes (MALAVOLTA, 2006), devendo haver, portanto, um planejamento estratégico de manejo adequado de aplicação para que não ocorra o desequilíbrio deste nutriente no solo.

A distribuição espacial da matéria orgânica (M.O) pode ser visualizada na Figura 6c. Na profundidade 0,0-0,10 m, encontram-se percentuais de médio a bom, variando de 2 a 4 (%) em ambas profundidades avaliadas de acordo com a classificação proposta por Ribeiro et al. (1999).

Valores adequados contribuem para maior produtividade, uma vez que a matéria orgânica do solo tem como benefícios a melhora de infiltração de água no solo, bem como a melhora de sua estrutura física, conseqüentemente fornecendo nutrientes essenciais as plantas e aumentando por assim a sua capacidade de troca catiônica (CTC) entre outros fatores (Silva et al., 2012).

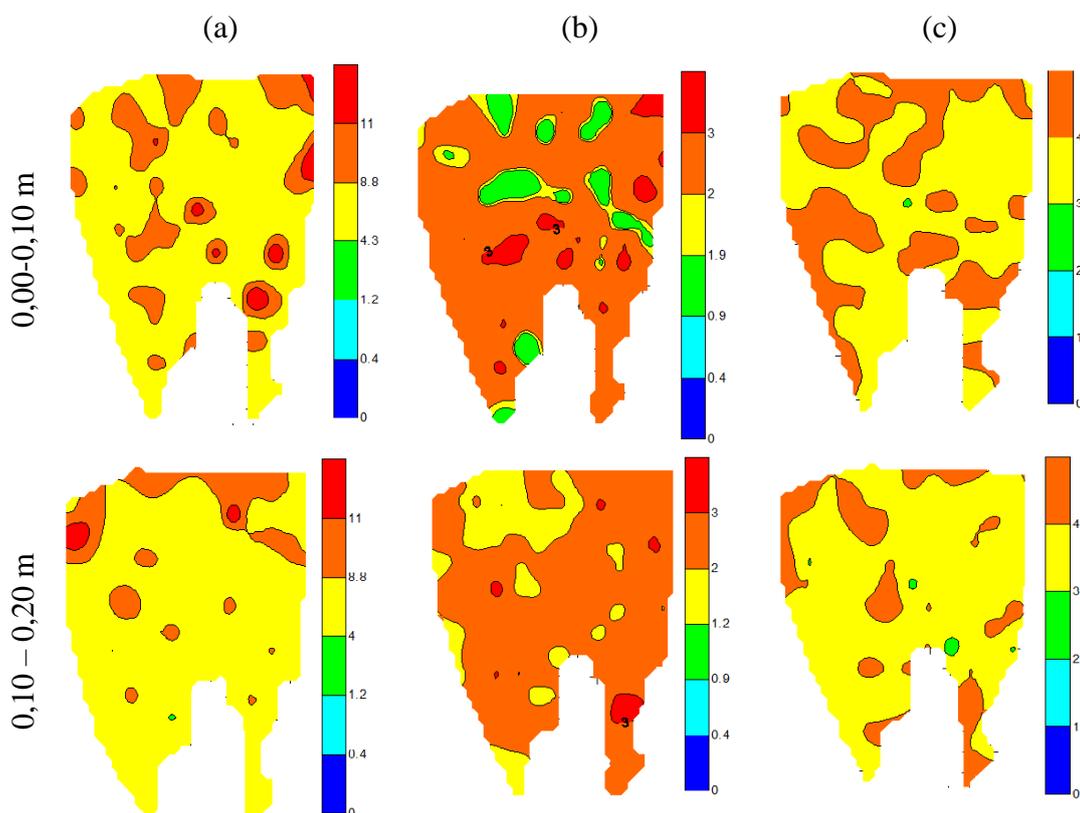


Figura 6. Mapas dos atributos químicos do solo ( $\text{cmol dm}^{-3}$ ): (a) – Cálcio, (b) – Magnésio, (c) – Matéria orgânica (%).

A acidez potencial (H+Al) é aquela que limita o crescimento das raízes e ocupa espaços nos colóides possibilitando que os nutrientes livres na solução do solo sejam lixiviados (Figuras 7a). A ocorrência de teores da acidez potencial (H+Al) variou de baixo a muito bom ( $1,0$  a  $16 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) (RIBEIRO et al., 1999) na profundidade de  $0,0-0,10 \text{ m}$ , sendo predominante a classificação média ( $2,51 - 5,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) representada pela cor verde, entretanto para profundidade  $0,10-0,20 \text{ m}$  o nível com predominância foi também o médio ( $2,51 - 5,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ), sendo assim, em ambas as profundidades, a área apresenta um gradiente de redução da acidez potencial (Figura 7a).

Com relação à soma de bases (SB), (Figura 7b) de acordo com Ribeiro et al. (1999), esta classifica-se como muito boa quando se obtém um valor maior que  $6,0$  ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ), sendo assim, pela classificação adotada, 100% da área em ambas as profundidades se encontra com SB muito boa.

A CTC é um parâmetro utilizado para calcular a dose de calcário que poderá ou deverá vir a ser incorporada ao solo da área, visto que CTC dá uma idéia do potencial de bases trocáveis que o solo pode reter em forma disponível, caso sua acidez seja corrigida. A CTC do solo apresentou-se adequada de acordo com os níveis em ambas

as camadas, fato este observado nos mapas de isolinhas, com predominância elevado em praticamente toda a área nas cores amarelo (nível bom – de 10,8 a 14,4  $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) e laranja (nível alto  $> 14 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) (RIBEIRO et al., 1999).

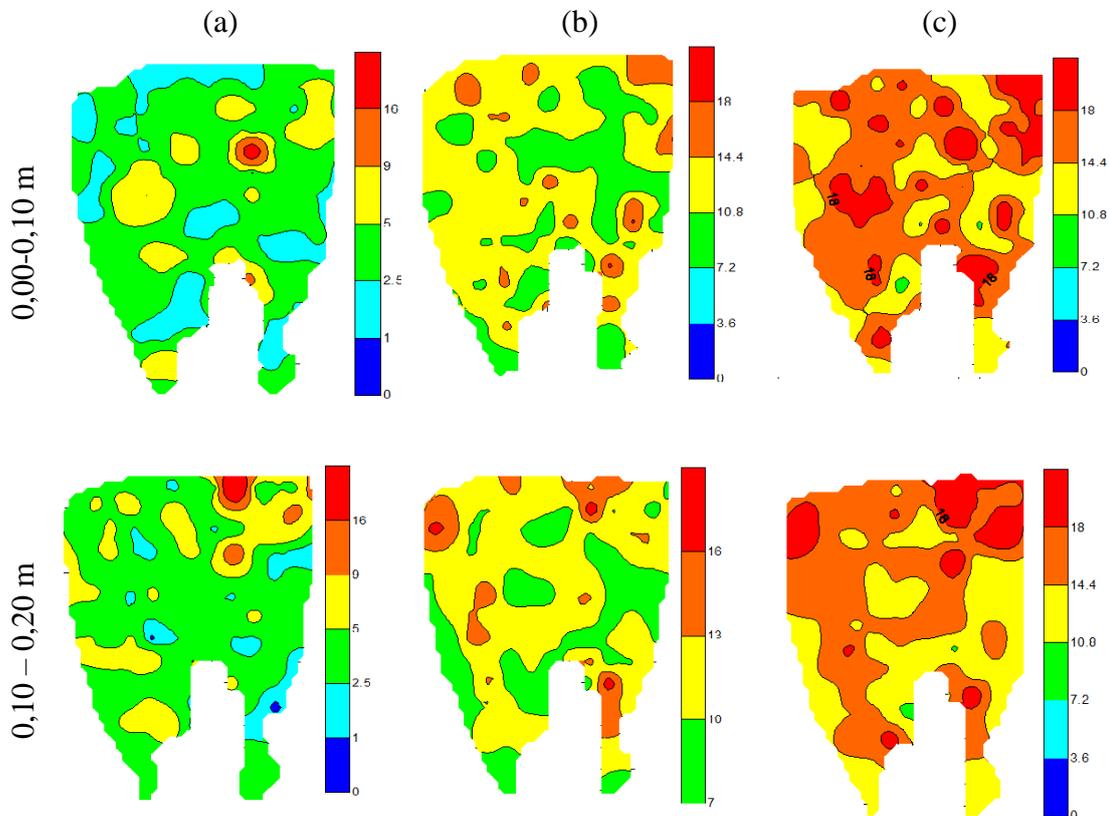


Figura 7. Mapas dos atributos químicos do solo ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ). (a) – H + Al, (b) – soma de bases, (c) – CTC.

Os solos diferem em sua capacidade de reter  $\text{K}^+$  trocável. A CTC depende da matéria orgânica e do tipo de argila presentes no solo. Assim, um solo com elevado teor de argila, pode reter mais cátions trocáveis do que um solo com baixo teor de argila. De acordo com Timm et al. (2009), a CTC aumenta também de acordo com a quantidade de matéria orgânica no solo, quanto maior o teor de matéria orgânica, maior será a CTC do solo, o que corrobora neste estudo.

A saturação por bases (V%) (Figura 8) apresentou, nas duas profundidades com valores entre 60 e 80% (nível bom) em maior parte da área e uma pequena parte variando de (40-60%) (nível médio). As áreas com maior ocorrência de saturação por bases médios e altos podem ser consideradas de melhor qualidade e refletem em alto

potencial do solo para a nutrição da planta. Considerando os altos valores da saturação por bases, nesta área não é necessária a realização de calagem.

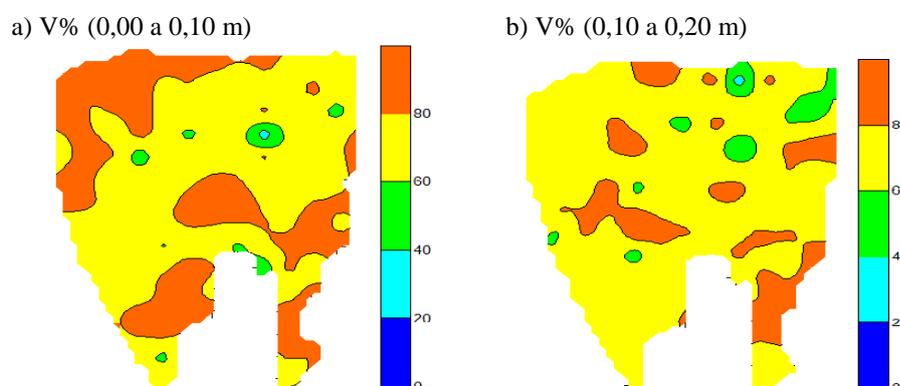


Figura 8. Mapas de saturação de bases (V%).

### 4.3 Produtividade de grãos de soja e milho

Os mapas de produtividades são a informação mais completa para visualizar a variabilidade espacial existente nas lavouras. Para Molin (2000), inicialmente assume-se que o mapa de produtividade de um talhão é um conjunto de muitos pontos.

O mapa de produtividade produz informações detalhadas sobre produtividade do talhão e fornece parâmetros para diagnosticar e corrigir as causas de baixas produtividades em algumas áreas do talhão. Os mapas são gerados em ( $\text{kg há}^{-1}$  ou  $\text{sc há}^{-1}$ ), como mostra através da localização dada pelo GNSS (Global Navigation Satellite System) e mais as informações disponibilizadas pelos sensores instalados na máquina, como o sensor de produtividade e o sensor de umidade dos grãos.

Foram gerados mapas compostos para a cultura do milho (Figura 9) e milho/soja (Figura 10) para a geração de unidades de gestão diferenciadas (UGDs), utilizando o método de normalização pela média.

Observando-se o mapa composto da média da produtividade do milho nas safras 2015/2016 (Figura 9), verifica-se que, em aproximadamente 31 há, obteve-se produtividade superior a  $8.400,00 \text{ kg há}^{-1}$ , o que corresponde a 24,6% da área. De maneira geral, a maior parte da área esteve dentro da média nacional de produtividade, variando entre  $4.200,00$  a  $6.000,00 \text{ kg há}^{-1}$ .

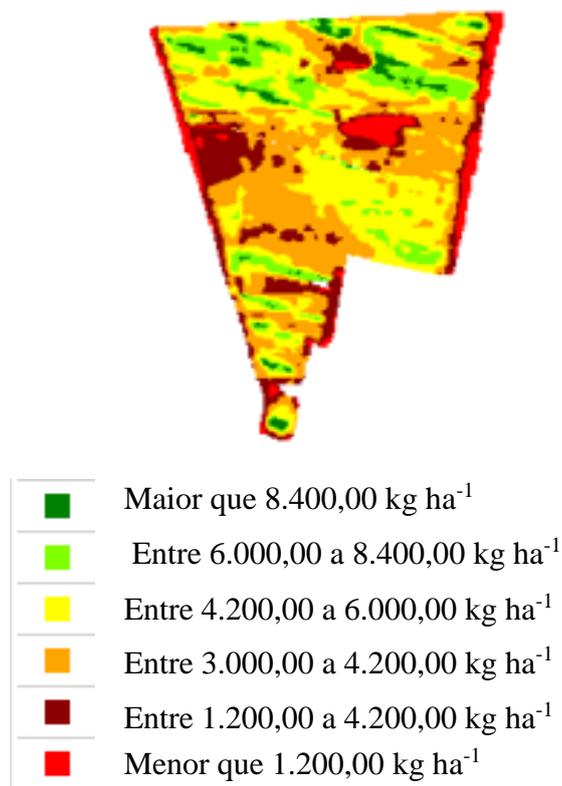


Figura 9. Mapa da produtividade média do milho nas safras 2015 e 2016 (kg ha<sup>-1</sup>).

A safra 2015/2016 foi considerada acima da média, pois segundo dados da CONAB (2015), a média do Estado de Mato Grosso do Sul para a cultura do milho nesta safra foi 5.203 kg ha<sup>-1</sup>; porém, em 2016 o valor ficou abaixo da média nacional, que de acordo com a CONAB (2016), foi de 4.79 kg ha<sup>-1</sup>, o que nos remete a classificar como abaixo da expectativa. Esta diferença de produtividade entre os anos pode ser justificado pelo estresse hídrico ocorrido no período coincidente com o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura, no qual o índice de precipitação pluviométrico excedeu consideravelmente na safra 2016 em relação à safra 2015. Com isso, a operação de colheita foi executada tardiamente, e com teor de água do produto um pouco acima de 15,5%, o qual não é adequado para o processo, conseqüentemente favorecendo as perdas e influenciando diretamente na produtividade da cultura.

Comparando-se a camada normalizada para a cultura da soja/milho (Figura 10), os índices negativos presentes no mapa indicam que o local apresenta baixa produtividade. Durante o ciclo da cultura da soja, nos meses de dezembro e janeiro houve elevados índices de precipitações, ocasionando certa perda por este fator.

Entretanto, observam-se valores de produtividade acima da média em grande parte da área (aproximadamente 162,36 ha), sendo assim, a produtividade foi considerada excelente.

A

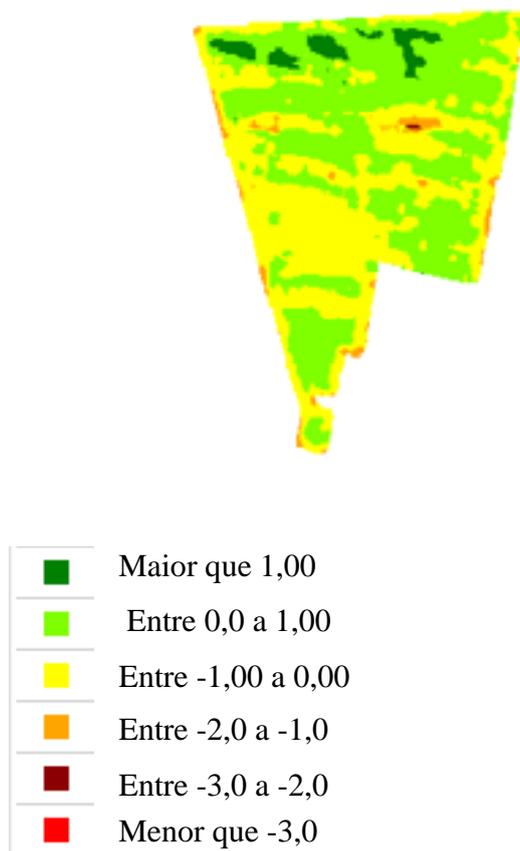


Figura 10. Mapa da produtividade média do milho nas safras 2015 e 2016 e soja 2015.

## 5 CONCLUSÕES

A resistência mecânica do solo à penetração apresentou dependência espacial em todas as camadas avaliadas.

A granulometria do solo apresentou dependência espacial com ajustes dos semivariogramas aos modelos esférico e exponencial, sendo os maiores alcances encontrados para a camada 0,10-0,20 m.

Os atributos químicos estudados apresentaram dependência espacial, exceto a variável CTC na camada 0,10-0,20 m.

Os métodos geoestatísticos permitiram eficiência na caracterização química do solo e sua distribuição espacial da fertilidade, sendo estes, apresentáveis em níveis agronômicos bons.

Os mapas de produtividade evidenciam pontos da área com baixa produtividade, além de pontos na bordadura da área e por fatores climatológicos influenciarem diretamente na produtividade, no entanto sua produção ao longo das safras foi satisfatória.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, J. F.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Definição das zonas de manejo com base nas características do solo em viticultura de precisão: Estudo de caso no Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves, RS. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. 2012. Ribeirão Preto. Anais. Ribeirão Preto, 2012.

ALVARENGA, R.C.; CRUZ, J.C. Manejo de solos e agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. A cultura do milho irrigado. Brasília: p.70-106. Embrapa Informação Tecnológica, 2003.

ALVAREZ V, V.H.; RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a. aproximação. 1999. Viçosa, Minas Gerais. Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/58701933/5%C2%AA-Aproximacao-Manual-de-Adubacoes-PDF>> Acesso em: 13 de març. 2017.

ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. Bioscience Journal, v. 30, p. 22-30, 2014.

ANDRIOTTI, J. L. S. Introdução à geoestatística. Ata Leopoldensia, São Leopoldo, v. 11, n. 27, p. 5-81, 1989.

ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, P. D.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade dos atributos químicos do solo, associado ao microrrelevo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.2, p. 141-149. 2014.

ASSUMPCÃO, B.R.; URIBE-OPAZO, M.A.; GALEA, M. Analysis of local influence in geostatistics using Student's t-distribution. **Journal of Applied Statistics**, London, v. 41, n. 11, p. 2323-2341, 2014.

BAZZI C. L.; SOUZA E. G.; KONOPATSKI M. R.; OPAZO M. A. U.; RODRIGUES F. A. Unidades de Manejo em Pomar de Peras In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. 2012. Ribeirão Preto. Anais Ribeirão Preto, 2012.

BAZZI C. L.; SOUZA E. G.; OPAZO M. A. U.; CARNIELETTO J. C.; ROCHA D. M. Software Para Definição e Avaliação de Unidades de Manejo em Agricultura de Precisão In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. 2012. Ribeirão Preto. Anais. Ribeirão Preto, 2012.

BERNARDI, A. C. DE. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 205-221, jan./ago. 2015.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>.

BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. *R. Bras. Ci. Agrárias*, 6:331-336, 2011.

BORGES, J. R.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O.; PINTO, L.F.S.; LEITZKE, V. W. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. *Revista Brasileira de Agrociência*, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasil Projeções do Agronegócios: 2010/2011 a 220/2021. Brasília, DF, 2011. Disponível em: . Acesso em: 03 Dez. 2016.

BRASIL. MAPA: Agricultura de precisão. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília:Mapa/ACS, 2013.

BRASIL. Agricultura de precisão. Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília: Mapa//ACS, 2014. 21 p. (Agenda Estratégica 2014 – 2025).

CAMARGO, L.A.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G.T. & ALLEONI, L.R.F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. *Catena*, 100:100-106, 2013a.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2016.

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

CAMPOS, M.C.C.; OLIVEIRA, I.A.; SANTOS, L.A.C.; AQUINO, R.E. & SOARES, M.D.R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *R. Agro@mbiente On-line*, 6:11-16, 2012.

CAMPOS, M.C.C.; FERRAZ, F.B.; FREITAS, E.V.S. & SOUZA, Z.M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodosolo da zona da mata de Pernambuco. *R. Biol. Ci. Terra*, 7:84-91, 2007.

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

CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 06, p. 1161-1164, 2003.

COELHO, D.S., CORTEZ, J.W., OLSZEWSKII, N. 2012. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36: 755-763.

CONAB (COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2014-2015. 2015. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_03\\_11\\_14\\_07\\_48\\_boletim\\_graos\\_marco\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_03_11_14_07_48_boletim_graos_marco_2015.pdf)>. Acesso em: Out. 2016.

CONAB – Companhia nacional de Abastecimento. Boletim de grãos. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_01\\_12\\_09\\_00\\_46\\_boletim\\_graos\\_janeiro\\_2016.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_01_12_09_00_46_boletim_graos_janeiro_2016.pdf)>. Acesso em: 13 nov 2016.

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

CRUZ JS, ASSIS JUNIOR RN, MATIAS SSR, CAMACHO-TAMAYO JH, TAVARES RC. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Ciências Agrotécnicas*. 2010;34:271-8.

DALCHIAVON, F. C. et al. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 541-552, 2012.

DEERE & COMPANY. **Apex: software para gerenciamento de fazendas**. [S.L.], 236p, 2016.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. Produção de Milho. 2ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360p.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Análise espacial de dados geográficos. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 412 p.

EMBRAPA – Embrapa Solos. Manual de análises químicas de solos e fertilizantes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília: Embrapa Solos, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Expansão Potencial da Produção de milho 2ª safra no Brasil no Sistema de Sucessão Soja-Milho Considerando o Zoneamento de Risco Climático 2014/2015**. 1.ed. Sete Lagoas, MG, Embrapa Milho e Sorgo, p.124, 2015.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Componentes Inorgânicos de Plantas. In: EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2 ed. Londrina: Editora Planta, 2006. v.1, cap. 3, p. 41-65.

FALKER. 2010. PenetroLOG PLG1020 - Medidor Eletrônico de Compactação do Solo. Disponível em: < <http://www.falker.com.br/download.php>>. Acesso em: 29 nov 2016.

FALKER Automação Agrícola. Manual: coletor de dados e navegação em campo. Porto Alegre: Falker, 2013b. 31p.

FAMASUL, Federação da Agricultura e Pecuária de MS. Disponível em: < [http://famasul.com.br/assessoria\\_interna/dados-finais-da-aprosoja-ms-confirmam-recorde-na-produção-da-soja-da-safra-2015-2016/4216/](http://famasul.com.br/assessoria_interna/dados-finais-da-aprosoja-ms-confirmam-recorde-na-produção-da-soja-da-safra-2015-2016/4216/)>.

FERRAZ, G. A. S. **Cafecultura de precisão**: malhas amostrais para o mapeamento de atributos do solo, da planta e recomendações. 2012. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GUIMARAES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 78 p. v. 1.

GURGEL, F.L. A cultura da soja. 2007 Disponível em: HANSEL, F, D., OLIVEIRA, M, L. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. *Informações Agronômicas*. In: IPNI – International Plant Nutrition Institute. 153: 8p, 2016.

INAMASU, R. Y. Estratégia de implantação, gestão e funcionamento da Rede Agricultura de Precisão. In: *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 31-40.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. *An introduction to applied geostatistics*. New York, Oxford University Press, 1989.561p.

KESTRING, F. B. F.; GUEDES, L. P. C.; BASTIANE, F. D.; OPAZO, M. A. U. COMPARAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS DE DIFERENTES GRADES AMOSTRAIS PARA A PRODUTIVIDADE DA SOJA. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. V. 35, n. 4, p. 733-743, 2015.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais**. 4. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 160 p.

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

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**. v.52, p.119-139, 1951.

KITAMURA, A.E.; MOREL De. P.C.; ROCHA, C.L.G. 2007. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31: 361-369.

LANDIM, P. M. B. Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2010. 229 p. (Texto Didático, 15).

MALAVOLTA, E. Funções dos Macro e Micronutri-entes. In: MALAVOLTA, E. (Ed.). **Manual de Nu-trição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. cap. 4, p. 124-402.

MANN, K. K.; SCHUMANN, A. W.; OBREZA, T. A. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. *Precision Agriculture, Secaucus*, v.12,4, p.457-472, 2010.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, 58:1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 135:177-183, 1983.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. *Agricultura de Precisão*, 1 ed, São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão**: o gerenciamento da variabilidade. 3. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 2008. 83p.

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. **Agricultura de precisão**: o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba, p.83, 2001.

MOLIN, J.P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para a agricultura de precisão. In: BORÉM, A. et al. *Agricultura de precisão*. Viçosa: UFV, 2000. p.237-257.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:69-77, 2005.

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

NETO, F. D. C. C.; SAMPAIO, F. M. T.; VELOSO, E. C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. F. Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração em Neossolo Litólico Degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 39, p. 1353-1361, 2015.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C; AQUINO, R. E.; SIQUEIRA, D. S.; FREITAS, L. Spatial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earth and native forest soil in Manicoré, AM.Floresta,v.44,n.4, p. 735-746, 2014. <<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v44i4.29988>>.

OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.P.R.; AQUINO, R.E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E.P. 2013. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háptico sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37: 1103-1112.

OLIVER, M. A. An overview of Precision agriculture. In: OLIVER, M. A.; BISHOP, T. F. A.; MARCHANT, B. P. Precision agriculture for sustainability and environmental protection. Abingdon, oxon, UK: Routledge, 2013. P. 01-58.

OVALLES, F.; REY, J. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión Del Lago de Valencia. *Agronomia Tropical*, Maracay, v.44, n.1, p.41-65, 1994.

PAVINATO, P.S., CERETTA, C.A., GIROTTO, E., MOREIRA, I.C.L. 2008. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. *Ciência Rural* 38(2): 358-364.

PINAZZA, L. A. (Coord.). **Cadeia produtiva da soja**. Brasília, DF: Mapa, SPA: IICA, 2007. (Agronegócios, 2).

PRADO, H. **Pedologia Fácil Aplicações na Agricultura**. Piracicaba. 1.ed. p.105, 2007.

RIBEIRO, C. A.; GUIMARÃES P. T. G.; ALVAREZ V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.

RESENDE, J. M. A.; JUNIOR, J. M.; FILHO, M. V. M.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. D.; TEIXEIRA, D. D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1077-1090, 2014.

RODRIGUES, J. B. T.; ZIMBACK, C. R. L. Delimitação de zonas de manejo através da análise e classificação de mapas de produtividade de milho e soja. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v.17, n.1, p.44-61, 2002.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Bo-letim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, 2010. 26 p.

ROSALEN, D. L.; RODRIGUES, M. S.; CHIODEROLI, C. A.; BRANDÃO, F. J. C.; SIQUEIRA, D. S. GPS receivers for georeferencing of spatial variability of soil attributes. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 6, p. 1162-1169, 2011.

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.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Teores de nutrientes e matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistema de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 387-394, 2001.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In : MEURER, E. J. (Ed) Fundamentos de química do solo. Porto Alegre: Evangraf, 2012. 69 p.

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*, 27:1013- 1020, 2003.

SILVA NETO, S.P.; SANTOS, A.C.; LEITE, R.L.L.; DIM, V.P.; CRUZ, R.S.; PEDRICO, A. & NEVES NETO, D.N. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. *Semina: Ci. Agron.*, 32:541-552, 2011.

SOUZA, A. P. et al. Classificação Climática e Balanço Hídrico Climatológico no Estado de Mato Grosso Nativa, *Sinop*, v.1, n.1, p.34-43, out./dez. 2013.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distroférico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 01, p. 133-139, 2003.

SOUZA, C.K. et al. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.486-495, 2003.

TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q.; REISSER, J. C.; ESTRELA, C.C. *Morangueiro Irrigado: aspectos técnicos e ambientais do cultivo*. 1. ed. Pelotas: Ed. da Universidade Federal de Pelotas, 2009. 163p.

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.

TSCHIELDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução a agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.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, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical the oryand application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51:1-75, 1983.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidade em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 37, n. 04, p. 1000-1007, 2007.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. D. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em area cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v. 18, n. 6, p. 595-602, 2014.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. *Environmental soil physics*. New York: Academic, p.655-675, 1998.

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

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, v. 97, n. 03/04, p. 149 - 163, 2000.

