

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ALEXANDRE DA SILVA ADÃO

**COMPONENTES DE RENDIMENTO DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DE
SISTEMAS DE PREPARO E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

ALEXANDRE DA SILVA ADÃO

**COMPONENTES DE RENDIMENTO DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DE
SISTEMAS DE PREPARO E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Haroldo Carlos Fernandes

Coorientadores: Nerilson Terra Santos
Frederico Cássio Moreira Martins

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A221c
2020 Adão, Alexandre da Silva, 1982-
Componentes de rendimento da cultura do milho em função
de sistemas de preparo e da variabilidade espacial dos atributos
físicos do solo / Alexandre da Silva Adão. – Viçosa, MG, 2020.
126 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Haroldo Carlos Fernandes.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.107-126.

1. Agricultura de precisão. 2. Geologia - Métodos
estatísticos. 3. Amostragem. 4. *Zea Mays*. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

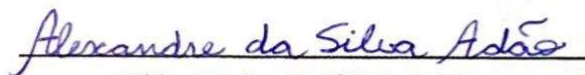
ALEXANDRE DA SILVA ADÃO

**COMPONENTES DE RENDIMENTO DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DE
SISTEMAS DE PREPARO E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 28 de outubro de 2020.

Assentimento:



Alexandre da Silva Adão

Autor



Haroldo Carlos Fernandes

Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pela oportunidade, força e determinação. A ELE toda honra e toda glória.

Aos meus pais, Marques e Rosilene, pelo apoio incondicional, motivação e incentivo, desde os primeiros rabiscos até a conclusão de mais esta etapa.

Aos meus irmãos, Marques e Júlio, pelo companheirismo, amizade e presença.

À minha querida avó Geralda, pelo exemplo, ternura, cumplicidade e apoio.

À Laura, pelo amor, companheirismo e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - *Campus* Barbacena, pela oportunidade, suporte e apoio ilimitado em todas as etapas do curso de Doutorado.

Aos amigos da turma de Doutorado, em especial à Flávia, Gustavo, João Pedro e Priscila pelos inúmeros auxílios, troca de experiências e amizade.

Ao professor e orientador Haroldo Carlos Fernandes, pela primeira das oportunidades, orientação e incentivo constante na realização deste trabalho.

Ao professor Nerilson Terra Santos, pelas valiosas sugestões, esclarecimentos e contribuição ímpar neste trabalho.

Ao amigo e professor Frederico Cássio Moreira Martins, pelo irrestrito apoio fornecido, em todas as etapas do Doutorado.

Ao professor, colega de trabalho e coordenador do Doutorado Interinstitucional, Marcos Caldeira Ribeiro, pelo incentivo, amizade e apoio.

Aos demais professores que contribuíram com seus ensinamentos durante o curso de Doutorado.

Aos amigos José Henrique, Everton e Carlos Antunes pelo apoio constante durante a realização do experimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Aos demais familiares, amigos e alunos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALEXANDRE DA SILVA ADÃO, filho de Marques Francisco Adão e de Rosilene Onda da Silva Adão, nasceu em 25 de março de 1982, no município de Barbacena, Minas Gerais.

Em 1999 concluiu o Ensino Médio no Colégio Tiradentes da Polícia Militar do Estado de Minas Gerais, em Barbacena, Minas Gerais. Gradou-se em Matemática pela Universidade Presidente Antônio Carlos, em Barbacena, Minas Gerais, em 2003.

Em 2009, ingressou no Programa de Pós-graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, área de concentração Estatística Experimental, em nível de mestrado, pelo Departamento de Estatística da Universidade Federal de Lavras.

Em fevereiro de 2011, submeteu-se à defesa pública de dissertação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Em agosto de 2017, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em outubro de 2020, submeteu-se à defesa pública de tese, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

RESUMO

ADÃO, Alexandre da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2020. **Componentes de rendimento da cultura do milho em função de sistemas de preparo e da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo.** Orientador: Haroldo Carlos Fernandes. Coorientadores: Frederico Cássio Moreira Martins e Nerilson Terra Santos.

Vários são os fatores que interferem na variabilidade espacial das culturas, sendo um destes, os atributos físicos do solo. A variabilidade espacial do solo deve ser considerada sempre que um processo de amostragem for realizado, podendo indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado. Com o aprimoramento da agricultura de precisão, a análise geoestatística dos atributos físicos do solo relacionados aos componentes de rendimento da cultura do milho, atrelados aos métodos de preparo, vêm se intensificando. Para tanto, objetivou-se através deste trabalho, avaliar os componentes de rendimento da cultura do milho em função dos sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto, e da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. O experimento foi conduzido em uma área pertencente ao Núcleo de Agricultura do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, *Campus* Barbacena, localizada no município de Barbacena/MG. Foi utilizada uma área experimental de aproximadamente 2,13 ha, subdividida em três partes, cada uma delas, recebendo um sistema de manejo de solo. Inicialmente, visando a caracterização química do solo, foram georreferenciados no mínimo 150 pontos em cada uma das três subáreas, utilizando-se de uma malha irregular, e coletadas amostras simples e deformadas de solo nos referidos pontos. Posteriormente, visando a análise dos atributos físicos do solo, com auxílio de um aparelho receptor GPS GARMIN modelo Summit HC, uma malha amostral regular foi definida de acordo com a dimensão de cada uma das três subáreas, visando obter um número aproximado de 150 pontos em cada uma delas. Nos pontos definidos, foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas 0 - 0,15 m e 0,15 - 0,30 m e avaliados os atributos: umidade gravimétrica, densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total e textura. Para a avaliação da resistência do solo a penetração, foi utilizado um penetrômetro Falker, modelo PLG1020. Para avaliação dos componentes de rendimento do milho, foram mensurados: número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, peso de grãos por espiga e peso de mil

grãos da amostra. Realizou-se a análise estatística descritiva dos dados, correlação de Pearson e análise geoestatística. Os atributos físicos do solo analisados não variaram aleatoriamente e apresentaram variabilidade entre alta, média e baixa dos dados, seguindo padrões espaciais bem definidos. O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo pela geoestatística, utilizando a técnica da krigagem, mostrou-se eficiente na geração de mapas georreferenciados. Os valores de alcance encontrados nos semivariograma simples para o peso de grãos por espiga foram maiores no sistema de preparo convencional, seguido pelo cultivo mínimo e pelo plantio direto, respectivamente.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Geoestatística. Dependência espacial. Amostragem. *Zea mays*.

ABSTRACT

ADÃO, Alexandre da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2020. **Yield components of corn crop according to tillage systems and spatial variability of soil physical attributes.** Advisor: Haroldo Carlos Fernandes. Co-Advisors: Frederico Cássio Moreira Martins and Nerilson Terra Santos.

There are several factors that interfere in the spatial variability of crops, one of which is the physical attributes of the soil. The spatial variability of the soil must be considered whenever a sampling process is carried out, which may indicate places that need different treatment. With the improvement of precision agriculture, the geostatistical analysis of the physical attributes of the soil related to the yield components of the corn crop, linked to the preparation methods, has been intensified. For this purpose, the objective of this work was to evaluate the yield components of the corn crop according to the systems of conventional tillage, minimum cultivation and no-till, and the spatial variability of the physical attributes of the soil. The experiment was conducted in an area belonging to the Agriculture Center of the Federal Institute of Southeast Minas Gerais, Campus Barbacena, located in the city of Barbacena / MG. An experimental area of approximately 2.13 ha was used, subdivided into three parts, each one, receiving a soil management system. Initially, aiming at the chemical characterization of the soil, at least 150 points were georeferenced in each of the three sub-areas, using an irregular mesh, and simple and deformed soil samples were collected at the referred points. Subsequently, aiming at the analysis of the physical attributes of the soil, with the aid of a GARMIN GPS receiver model Summit HC, a regular sampling mesh was defined according to the dimension of each of the three sub-areas, aiming to obtain an approximate number of 150 points in each one of them. At the defined points, undisturbed soil samples were collected in layers 0 - 0.15 m and 0.15 - 0.30 m and the following attributes were evaluated: gravimetric moisture, soil density, particle density, total porosity and texture. For the assessment of soil resistance to penetration, a Falker penetrometer, model PLG1020, was used. To evaluate the components of corn yield, the following were measured: number of rows per ear, number of grains per row, number of grains per ear, weight of grains per ear and weight of one thousand grains in the sample. Descriptive statistical analysis of the data, Pearson's correlation and geostatistical analysis were performed. The physical attributes of the analyzed soil did not vary randomly and showed variability between high, medium and low data,

following well-defined spatial patterns. The study of the spatial variability of the physical attributes of the soil by geostatistics, using the kriging technique, proved to be efficient in the generation of georeferenced maps. The reach values found in the simple semivariogram for grain weight per ear were higher in the conventional tillage system, followed by minimum cultivation and no-tillage, respectively.

Keywords: Precision agriculture. Geostatistics. Spatial dependence. Soil sampling. *Zea mays*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Semivariograma empírico (pontos) e semivariograma teórico (linha contínua) da distância de separação entre pares de pontos (h) em função da semivariância $\gamma(h)$	38
Figura 2 - Modelos teóricos de semivariograma da distância de separação entre (h) em função da semivariância $\gamma(h)$	42
Figura 3 - Trator agrícola utilizado	47
Figura 4 - Semeadora utilizada	48
Figura 5 - Aparelho receptor GPS GARMIN eTrex Summit HC	49
Figura 6 - Imagem aérea das três áreas de estudo com os pontos georreferenciados	49
Figura 7 - Trado tipo holandês	50
Figura 8 - Amostras de solo coletadas para análise química	50
Figura 9 - Tela do <i>software</i> TrackMaker com as áreas e os pontos	53
Figura 10 - Processo de coleta de amostras indeformadas	54
Figura 11 - Trado tipo castelinho, cápsula de alumínio e anel volumétrico utilizados na coleta de amostras indeformadas	54
Figura 12 - Amostras de solo acondicionadas em cápsulas de alumínio	55
Figura 13 - Amostras de solo transferidas para a estufa a 105° C	55
Figura 14 - Dessecador utilizado	56
Figura 15 - Balança de precisão utilizada	56
Figura 16 - Paquímetro digital	57
Figura 17 - Amostra de solo coletada no anel volumétrico	57
Figura 18 - Bureta e balões volumétricos de 50 ml utilizados	58
Figura 19 - Agitador Tipo Wagner utilizado	60
Figura 20 - Provetas contendo a mistura de argila com silte	61
Figura 21 - Penetrômetro Falker PLG1020 utilizado	61
Figura 22 - Ponto de coleta das espigas de milho	63
Figura 23 - Amostra coletada em cada ponto formada por cinco espigas de milho ..	63
Figura 24 - Processo de contagem manual das fileiras e dos grãos presentes nas fileiras	64
Figura 25 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus mapas de krigagem no sistema de cultivo mínimo	

.....	90
Figura 26 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de cultivo mínimo	93
Figura 27 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus respectivos mapas de krigagem no sistema de preparo convencional	96
Figura 28 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de preparo convencional	99
Figura 29 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus mapas de krigagem no sistema de plantio direto	101
Figura 30 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de plantio direto	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo e para o potássio de acordo do valor de fósforo remanescente (P-rem)	51
Tabela 2 - Classe de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)	51
Tabela 3 - Classes de interpretação de fertilidade do solo para o complexo de troca catiônica	52
Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos atributos químicos do solo avaliados nos três sistemas de plantio	70
Tabela 5 - Estatísticas descritivas dos atributos granulométricos do solo avaliados nos três sistemas de plantio	73
Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no sistema cultivo mínimo	75
Tabela 7 - Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no preparo convencional	76
Tabela 8 - Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no plantio direto	78
Tabela 9 - Estatísticas descritivas dos componentes de rendimento dos grãos da cultura do milho dos três sistemas de plantio	81
Tabela 10 - Comparação das médias dos componentes de rendimento dos grãos de milho nos três sistemas de preparo do solo	83
Tabela 11 - Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o sistema de cultivo mínimo	84
Tabela 12 - Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o sistema preparo convencional	85
Tabela 13 - Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o plantio direto	86
Tabela 14 - Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema cultivo mínimo	89
Tabela 15 - Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de cultivo mínimo	92
Tabela 16 - Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para	

os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de preparo convencional	95
Tabela 17 - Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de preparo convencional	98
Tabela 18 - Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de plantio direto	100
Tabela 19 - Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de plantio direto	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	A cultura do milho	18
2.2	Sistemas de preparo de solo	18
2.2.1	CULTIVO MÍNIMO	19
2.2.2	PREPARO CONVENCIONAL	20
2.2.3	PLANTIO DIRETO	20
2.3	Variabilidade espacial dos atributos do solo	21
2.3.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	22
2.3.2	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	23
a)	UMIDADE DO SOLO	25
b)	DENSIDADE DO SOLO	25
c)	DENSIDADE DA PARTÍCULA	26
d)	POROSIDADE	27
e)	TEXTURA DO SOLO	28
f)	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	29
2.4	Correlação entre os coeficientes de rendimento das culturas e os atributos do solo	31
2.5	Agricultura de precisão	32
2.6	Estatística Descritiva	34
2.7	Análise de correlação	36
2.8	Análise Geoestatística	36
2.9	Número de amostras	45
3.	MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1	Características gerais	46
3.2	Caracterização físico-química do solo	47
3.3	A Cultura	47
3.4	Máquinas e equipamentos utilizado	47
3.5	Coleta de dados	48
3.5.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	49
3.5.2	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	52
a)	UMIDADE DO SOLO	55

b)	DENSIDADE DO SOLO	57
c)	DENSIDADE DA PARTÍCULA	58
d)	POROSIDADE TOTAL	59
e)	TEXTURA	59
f)	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	61
3.6	Componentes de rendimento dos grãos de milho	62
3.7	Análise de dados	65
3.7.1	ESTATÍSTICA DESCRITIVA	66
3.7.2	TESTE DE MÉDIAS	66
3.7.3	CORRELAÇÃO DE PEARSON	67
3.7.4	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	Análise descritiva	69
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	69
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL	72
4.1.3	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	74
a)	CULTIVO MÍNIMO	74
b)	PREPARO CONVENCIONAL	76
c)	PLANTIO DIRETO	77
d)	ASPECTOS GERAIS OBSERVADOS	79
4.1.4	COMPONENTES DE RENDIMENTO DOS GRÃOS DE MILHO	80
a)	COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DOS GRÃOS DA CULTURA DO MILHO NOS TRÊS SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO	83
4.2	Análise de correlação	84
4.2.1	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA CULTIVO MÍNIMO	84
4.2.2	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA PREPARO CONVENCIONAL	85
4.2.3	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO	86

4.2.4	ASPECTOS GERAIS OBSERVADOS	87
4.3	Análise geoestatística	88
4.3.1	CULTIVO MÍNIMO	88
a)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA DE CULTIVO MÍNIMO	88
b)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE CULTIVO MÍNIMO	92
4.3.2	PREPARO CONVENCIONAL	94
a)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA PREPARO CONVENCIONAL	94
b)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE PREPARO CONVENCIONAL	98
4.3.3	PLANTIO DIRETO	100
a)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	100
b)	ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	103
5	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays L.*) representa uma das mais importantes dentro do cenário da produção agropecuária mundial, alcançando o patamar de maior cultura agrícola do mundo. Simultaneamente à sua importância em termos de produção, a cultura do milho ainda se sobressai por diversos usos, sendo a principal fonte energética no processo de nutrição animal, pode ser utilizado na alimentação humana, faz parte de vários processos da indústria alimentícia e de bebidas e é uma importante matriz energética na produção de biocombustíveis, como o etanol.

Visando garantir a segurança alimentar futura, o uso de tecnologias vem sendo incrementado com o objetivo de aumentar a produtividade. A mecanização agrícola é indispensável na agricultura moderna, já que, atividades como preparo do solo, semeadura, pulverização e colheita são desenvolvidos com auxílio de máquinas, garantindo melhor produtividade e permitindo o cultivo em áreas maiores.

Dentro deste contexto, aparecem os diferentes sistemas de preparo de solo, que têm por finalidade criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. A escolha do sistema é complexa, mudando completamente com a região, tipo de solo e condições climáticas. Assim, a seleção de um sistema de preparo é muito importante no auxílio da conservação do solo. Na literatura encontram-se diversos sistemas, mas três são mais utilizados: preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto.

Basicamente, o sistema de preparo convencional consiste no revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporando corretivos e fertilizantes. Já o plantio direto, visa diminuir o impacto de máquinas agrícolas sobre o solo, mantendo-o sempre coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais. E no cultivo mínimo, que pode ser entendido como um sistema intermediário ao preparo convencional e o plantio direto, o uso de máquinas agrícolas sobre o solo é mínimo, tendo como objetivo menores índices de revolvimento e compactação.

A adoção por diferentes sistemas de preparo ocasiona diversas alterações no solo, sejam elas físicas ou químicas, em seus atributos, refletindo em diferentes manifestações de suas características. Dessa forma, a caracterização dos atributos do solo é de extrema importância pois retrata seu diagnóstico atual, indicando se os métodos empregados estão adequados às condições específicas da atividade e da região, tornando possível um melhor planejamento e execução das práticas.

Outro fator importante a ser considerado no planejamento é a heterogeneidade

do solo, responsável pela variação espacial e contínua de seus atributos, pois mesmo em locais considerados uniformes a aquisição de parâmetros de uma característica em alguns pontos pode apresentar alterações. A variabilidade espacial do solo deve ser considerada sempre que a amostragem de campo for realizada, podendo indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado quanto ao preparo, possibilitando um melhor detalhamento da área.

O emprego de técnicas de agricultura de precisão, como sua utilização no manejo localizado da fertilidade do solo em virtude da variabilidade espacial, vem sendo amplamente utilizado. Através de suas técnicas, se torna possível identificar a variabilidade espacial existente, possibilitando o gerenciamento de forma separada de locais que apresentam potenciais diferentes de desempenho. Uma abordagem adequada para o mapeamento da variabilidade espacial é a Geoestatística.

Na estatística clássica ao se analisarem os atributos do solo, as consequências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios são ignoradas. Já através do método geoestatístico, além de considerar a dependência espacial desses valores, são proporcionados meios para que sejam efetuados os respectivos mapeamentos, por meio da krigagem e/ou da cokrigagem. Uma vez conhecido o modelo da dependência espacial é possível mapear a área estudada, permitindo a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e a estimação não tendenciosa de valores destes atributos em locais não amostrados.

No presente trabalho, avalia-se os componentes de rendimento da cultura do milho em função dos sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto, e da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, através de técnicas da geoestatística.

Dentro do contexto apresentado, objetivou-se com este trabalho, determinar os componentes de rendimento da cultura do milho em função dos sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto, e da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. E como objetivos específicos:

- Determinar as variabilidades espaciais de atributos físicos do solo após a implantação da cultura do milho;
- Avaliar se componentes de rendimento do milho são afetados pelo sistema de cultivo adotado;
- Analisar se as dependências espaciais dos componentes de rendimento e dos atributos físicos do solo são influenciadas pelo sistema de cultivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do milho

O milho é uma gramínea explorada desde os primórdios da agricultura, existindo evidências de que a domesticação desta espécie teve início há mais de 10.000 anos (GALVÃO et al., 2017). No decorrer das últimas décadas, o milho alcançou o patamar de maior cultura agrícola do mundo, e de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), é a única a ter ultrapassado a marca de 1 bilhão de toneladas.

Segundo o último levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) referente à safra 2019/20, houve produção recorde de 102,5 milhões de toneladas, representando um acréscimo de 2,5% em relação à safra 2018/19. Os Estados Unidos aparecem como principal produtor com 345,89 milhões de toneladas produzidas, seguidos da China com 260,77 milhões de toneladas e, ocupando a terceira colocação, o Brasil com 102,5 milhões de toneladas (USDA, 2020). O Brasil, na safra 2019/20 obteve produtividade 5.533 kg ha⁻¹, registrando uma queda de aproximadamente 3,3% em relação à safra de 2018/19 (CONAB, 2020).

Para a safra 2020/21, o USDA indicou um ligeiro aumento na previsão da produção mundial, que deve registrar um recorde de 1.188,5 milhões de toneladas, representando um crescimento de 6,7% sobre a safra 2019/20. Com relação ao Brasil, tomando como base a expectativa de uma maior área de plantio, o USDA estima uma produção de 107 milhões de toneladas.

É importante destacar que o milho representa o cereal de maior volume de produção mundial e que o Brasil está entre os principais produtores. Em 2019, se tornou o maior exportador do grão no mundo, com o embarque de 44,9 milhões de toneladas, um crescimento de 88% em relação ao ano anterior (CONAB, 2020). O milho é também, o cereal mais produzido no Brasil e no Estado de Minas Gerais.

2.2 Sistemas de preparo de solo

O preparo do solo consiste em um conjunto de operações realizadas a fim de propiciar condições favoráveis à semeadura, ao desenvolvimento e à produção das plantas cultivadas. O manejo adequado do solo e da água é um pré-requisito que se

deve ter sempre em mente quando se estabelecem sistemas sustentáveis de cultivo.

Corroborando a isso, Galvão et al. (2017) afirmaram que o preparo do solo é definido como a manipulação física, química ou biológica deste, tendo por objetivo básico otimizar as condições de germinação, emergência e o estabelecimento das plântulas. Assim, a escolha do método de preparo e dos equipamentos a serem utilizados podem auxiliar, dentre outros benefícios, o controle das perdas de água e solo.

Segundo Cavalcante et al. (2011), os diferentes sistemas de preparo de solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Nesse procedimento, a estrutura do solo é perturbada com maior ou menor intensidade, dependendo do sistema de preparo adotado.

Llanillo et al. (2006) fizeram uma revisão que sintetiza os efeitos de três sistemas de manejo de solo. O plantio direto apresentou vantagens nos níveis de matéria orgânica, na compressibilidade e na condutividade hidráulica, mas aumentou a densidade do solo e resistência à penetração; o cultivo mínimo à base de escarificação apresentou-se eficiente na velocidade de infiltração, na condutividade hidráulica e na resistência à penetração, sendo intermediário entre preparo convencional e plantio direto nos demais aspectos; e o preparo convencional, apresentou os indicadores menos favoráveis de qualidade física dos solos, normalmente mais distantes das condições da cobertura vegetal original.

2.2.1 CULTIVO MÍNIMO

O cultivo mínimo (CM) é uma forma de preparo que mobiliza minimamente o solo deixando o máximo de cobertura vegetal. De acordo com Carvalho Filho et al. (2008), o CM é composto por uma escarificação, que não ocasiona inversão de leiva e tem menor custo de preparo, elevando a rugosidade superficial do solo tornando-o menos suscetível à erosão e às perdas de água e solo.

O processo de escarificação proporciona menor desagregação do solo, pois não há inversão das camadas, mantendo dessa forma, resíduos vegetais na superfície do solo, facilitando o controle da erosão, melhoria na infiltração e retenção de água, na estrutura e porosidade do solo (MACHADO et al., 2005).

Araújo et al. (2013) enfatizaram que o mínimo revolvimento do solo surge com o intuito de manter e aumentar os níveis de matéria orgânica do solo, a fim de que se

obtenha elevada produtividade aliado ao reduzido impacto ambiental. Reichert et al. (2009b) evidenciaram que a escarificação do solo promove a redução da densidade e da resistência do solo à penetração, com o mínimo possível de mobilização.

2.2.2 PREPARO CONVENCIONAL

O sistema de preparo convencional (SPC) é caracterizado pela composição de uma aração com arado de disco, chamada de preparo primário, e duas gradagens chamadas de preparo secundário, visando maior mobilização e desagregação do solo (FURLANI et al., 2004).

O preparo primário consiste em operações mais profundas que visam o revolvimento do solo, incorporando ou não restos de culturas, com objetivo de fornecer condições adequadas de aeração, umidificação, homogeneização da fertilidade e de combate a plantas invasoras e pragas. Já o preparo secundário do solo representa as operações superficiais, visando o nivelamento do terreno, o destorroamento, a incorporação de herbicidas e eliminação de plantas daninhas (CARVALHO FILHO et al., 2008).

O objetivo do SPC é fornecer boas condições para o plantio e emergência da cultura, reduzindo inicialmente espécies de plantas daninhas que podem inibir a germinação e o crescimento da cultura comercial, podendo acarretar em baixa produtividade (ALVARENGA et al., 2002).

Segundo Melo et al. (2013), o SPC se caracteriza por promover alta degradação na estrutura do solo devido à redução de sua cobertura. Outro fator observado é o provável aumento da compactação do solo, que pode surgir devido à intensificação das atividades de preparação, prejudicando o crescimento da raiz e consequentemente a produtividade de grãos.

2.2.3 PLANTIO DIRETO

Segundo Bowman et al. (2008) e Reichert et al. (2009a), o sistema de plantio direto (SPD) é um método que mobiliza o solo apenas na linha de semeadura, mantendo sua cobertura. O solo é manipulado no momento do plantio, quando é aberto um sulco onde são depositados sementes e fertilizantes, havendo o mínimo de revolvimento da camada superficial do solo.

O SPD é uma prática conservacionista especialmente adequada para as condições de ambiente de regiões tropicais, onde se faz necessário manter o solo protegido da ação do sol e da chuva. É caracterizado pela sua eficiência no controle de perdas de solo e água e na redução dos custos operacionais, sendo que a sua adoção tem viabilizado a implantação de sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, tornando-se a base da sustentabilidade (ASSIS & LANÇAS, 2005).

Atualmente, o SPD é o sistema de manejo de solo que reúne o mais amplo conjunto de preceitos da agricultura conservacionista, sendo considerado também por Carneiro et al. (2017), a mais adequada das tecnologias indicadas para produção agrícola brasileira e países tropicais.

O Brasil é um dos países que tem maior área agrícola cultivada em SPD, com 32,87 milhões de hectares, que correspondem a quase metade da área agrícola do País (IBGE, 2017). Segundo levantamento realizado por Bublitz (2014), com relação à área brasileira explorada pelo SPD, este sistema de preparo de solo corresponde a 86% da área cultivada com grãos.

2.3 Variabilidade espacial dos atributos do solo

Segundo Araújo et al. (2013), o uso e manejo do solo por diferentes sistemas acarretam em alterações da qualidade física e química de seus atributos, tendendo a um novo estado de equilíbrio, refletido em diferentes manifestações de suas características, as quais podem ser desfavoráveis à conservação da capacidade produtiva destes solos. Assim, a relação entre o manejo e a qualidade do solo pode ser avaliada pelo comportamento de seus indicadores físicos, químicos e biológicos.

O solo está distribuído na superfície terrestre de maneira mais homogênea em algumas partes que em outras. Essa situação de heterogeneidade do solo é responsável pela variação espacial e contínua de seus atributos (SIQUEIRA et al., 2008). É heterogêneo e sua variabilidade, sendo espacial, horizontal (em superfície) ou vertical (em profundidade) é uma soma dos fatores de formação do solo e o manejo utilizado ao longo dos anos na área (SOUZA et al., 2001).

A variabilidade espacial dos atributos dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises dos solos, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (SILVA

et al., 2010). Sua caracterização pode ser realizada por meio de amostragem e análise de solo, o que exige muito tempo e apresenta custo elevado. Para Cavalcante et al. (2007) o conhecimento dessa variabilidade representa um importante passo para empregar um manejo mais adequado, considerando estratégias de amostragem, aplicação de corretivos e fertilizantes, além de planejamento de delineamento de pesquisa em campo.

Com estas informações é possível mapear os atributos e construir mapas de recomendação, uma vez que levando em conta a variabilidade natural dos fatores de produção é possível otimizar as aplicações de corretivos e fertilizantes, realizando-as de maneira localizada, diminuindo a degradação do meio ambiente e melhorando os fatores de produção (ALVES et al., 2014).

Assim, a produção agrícola é afetada de forma direta por estes atributos, sejam eles físicos, químicos ou biológicos, sendo o conhecimento de sua variabilidade considerado o ponto de partida na determinação de estratégias de manejo do solo que procuram otimizar as operações agrícolas (KHAN, 2014).

2.3.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

O aumento da intensidade do uso do solo e a diminuição da cobertura vegetal nativa têm levado à degradação dos recursos naturais, como a diminuição da fertilidade e a desagregação do solo (CANELLAS et al., 2003).

Rangel e Silva (2007) afirmaram que os sistemas agrícolas que associam a monocultura contínua ao uso de equipamentos inadequados de preparo resultam em rápida degradação do solo. Após a retirada da vegetação natural, e a implantação de atividades agropecuárias, devido às ações que envolvem as diferentes formas de uso e manejo, provocam desequilíbrio no ecossistema, uma vez que o manejo adotado influenciará os processos físicos, químicos e biológicos do solo.

Segundo Stefanoski et al. (2013), é possível avaliar a relação entre o manejo e a qualidade do solo por meio das propriedades químicas. Diferentes usos e manejos do solo acarretam alterações nas propriedades químicas do solo, como pH, disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica, utilizados como indicadores da qualidade do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

As propriedades químicas dos solos são significativamente modificadas com a retirada da vegetação natural e o cultivo, principalmente na camada arável, em virtude

da adição de corretivos e fertilizantes e, ainda, de operações agrícolas. Essas alterações dependem de vários fatores, como a cultura implantada e o manejo utilizado, a classe e a fertilidade inicial do solo, o comportamento físico-químico de cada nutriente e suas interações com o meio (MARCHIORI JUNIOR & MELO, 2000).

As principais modificações nos solos cultivados em relação às condições originais decorreram do aumento do pH e dos teores de cátions, os quais são dependentes da fertilidade inicial, ou seja, solos eutróficos diminuem a fertilidade e os álicos aumentam, além da redução do alumínio trocável e da saturação por alumínio (GOLDIN & LAVKULICH, 1988). Diversas práticas agrícolas são empregadas nos solos que geralmente apresentam o pH ácido e baixa disponibilidade de nutrientes às plantas. Essas práticas visam principalmente à correção da acidez do solo, a fim de aumentar o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas (FURTINI NETO et al., 2001).

Conhecer detalhadamente a presença da variabilidade química e suas relações com a produtividade pode permitir implantar o manejo em sitio específico ou em taxa variada (COELHO, 2003). Uma análise integrada dos atributos de solo e vários mapas de produtividade, entretanto, podem revelar importantes interações entre os atributos do solo e o potencial produtivo, exibindo relações com sub-regiões na lavoura de maneira que se possam definir estratégias de manejo (AMADO et al., 2007).

Os estudos sobre as características químicas e propriedades físicas de solo ao longo dos tempos têm despertado o interesse dos pesquisadores, pois conhecendo essas características é possível que o homem possa compreender um pouco mais a dinâmica dos solos seja em áreas nativas ou de conversão. Dessa forma, há contribuição para a execução de um manejo de solo mais eficiente quanto ao aumento da fertilidade do solo e ao estabelecimento da paisagem, de modo a contribuir para uma maior sustentabilidade do meio ambiente (AVILA et al, 2018).

Avaliações de alterações nos atributos do solo, em razão de impactos da intervenção antrópica em ecossistemas naturais, podem constituir importante instrumento para auxiliar no monitoramento da conservação ambiental, pois permitem caracterizar a situação atual e prever situações futuras (CARDOSO et al., 2011).

2.3.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

As propriedades físicas do solo são definidas, de acordo com a Soil Science Society of America (1997), como sendo características, processos ou reações de um

solo que são causados por forças físicas e que podem ser descritos ou expressos em termos físicos ou equações. Assim, se as propriedades físicas do solo se encontram em condições adequadas unidas a condições ideais de práticas de manejo, tem-se um ambiente propício ao incremento na produção.

De acordo com Reynolds et al. (2002), o estabelecimento de relações entre atributos físicos do solo e o desenvolvimento e produção de plantas tem sido buscado por muitos anos, sendo encontrado para muitos casos. Porém, o que ocorre é que muitas vezes tais constatações não se repetem em condições similares. Com isso, sedimenta-se ainda mais a ideia de que valores ótimos relativos à qualidade física do solo, para melhorar a produtividade dos cultivos e manter ou melhorar as condições ambientais, ainda são largamente desconhecidos.

A avaliação dos atributos físicos do solo é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão, principalmente para verificar a influência do manejo na degradação da qualidade do solo (RAMOS et al., 2019). De acordo com Torres et al. (2015), o monitoramento dos atributos físicos do solo é uma ferramenta imprescindível no planejamento das práticas de cultivo a serem adotadas pois permitem monitorar a eficiência do sistema de manejo adotado.

A compactação do solo, segundo Collares et al. (2006), é a reorganização das partículas e agregados, aumentando a densidade do solo, reduzindo a macroporosidade, inibindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas. Leão et al. (2004) a consideraram como um fator limitante para produção agrícola, ocasionando perda de porosidade, diminuindo a disponibilidade de água, volume e distribuição de tamanho dos poros, estabilidade dos agregados do solo, influenciando na infiltração da água, erosão hídrica e restringindo o desenvolvimento de raiz, entre outros problemas. Atributos físicos do solo, como densidade e resistência à penetração, têm sido avaliados para determinar a presença de camadas compactadas atuando como indicadores de restrição ao crescimento radicular (RAMOS et al., 2019).

Ferreira e Dias Júnior (2001) destacaram que a compactação aumenta a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros. De acordo com Tormena et al. (1998), resultados de densidade do solo podem ser utilizados como indicador do estado da compactação do solo.

Por sua vez, monitorar estes atributos no solo não é uma questão simples, pois estes se constituem de uma complexa interação de fatores pedogenéticos. O material

de origem não é uniforme, já que, possuem diferenças em relação à dureza, composição química e cristalização, sendo também, influenciados pelas condições de clima e relevo, resultando assim na variabilidade espacial de seus atributos (MATIAS et al., 2015).

a) UMIDADE DO SOLO

A umidade do solo é definida como a quantidade de água armazenada numa determinada porção de solo na condição não saturada. Para Entin et al. (2000), a umidade constitui-se numa das variáveis mais importantes nos processos de troca entre solo e atmosfera.

A determinação umidade do solo é fundamental em várias situações na agricultura e é imperativa para definir o momento de operações mecanizadas e controlar o correto manejo da irrigação (KAISER et al., 2010).

Segundo Petry et al. (2007), a relação entre o armazenamento de água no solo e o rendimento de grãos de milho tem sido investigada. Embora o milho seja uma cultura eficiente no uso da água, o rendimento de grãos, sob diferentes condições de clima e manejo, está relacionado à distribuição e profundidade do sistema radicular e à disponibilidade de água às plantas em diferentes tipos de solo e sistemas de cultivo.

b) DENSIDADE DO SOLO

Silva et al. (2012) afirmaram que uma propriedade física comumente utilizada para caracterizar o estado de compactação é a densidade do solo, capaz de detectar modificações de volume fornecendo uma visão geral do estado do espaço poroso do solo. Tem ainda, a capacidade de caracterizar os efeitos do manejo do solo tão bem quanto propriedades intrínsecas do solo, como a matéria orgânica ou a textura.

Segundo Reichert et al. (2003), valores médios de densidade para solos argilosos variam de 1,30 a 1,40 kg dm⁻³, para solos franco-argilosos de 1,40 a 1,50 kg dm⁻³, para solos arenosos de 1,50 kg dm⁻³ a 1,60 kg dm⁻³ e para solos franco-arenosos variam de 1,70 a 1,80 kg dm⁻³. Camargo & Alleoni (1997), sugeriram que valores de densidade do solo com alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular situam-se em torno de 1,85 kg dm⁻³ para solos arenosos a franco-arenosos, e 1,55 kg dm⁻³ para solos franco-argilosos a argilosos.

O aumento na densidade do solo, pelo excesso de trabalho mecânico como o preparo do solo e plantio, ou tráfego intenso de máquinas pesadas, e pisoteio animal nas áreas de integração lavoura pecuária, em períodos de umidade alta do solo podem levar o mesmo a compactação (STEFANOSKI et al., 2013).

Nos solos compactados há uma resistência do mesmo à penetração do sistema radicular, que encontra dificuldades para se desenvolver e o processo de respiração das raízes é dificultado (VIANA, 2008). Assim, fica evidenciado que o comportamento da densidade do solo é altamente influenciado pelo método de manejo adotado.

Dessa forma, os sistemas de preparo interferem na qualidade física do solo, tornando o estudo de sua qualidade física de extrema importância. Em relação aos atributos do solo que mais influenciam os coeficientes de rendimento e produtividade da cultura do milho destacam-se a densidade e porosidade do solo (CAVALCANTE et al., 2011; LIMA et al., 2012).

Segundo Tormena et al. (2002), no CM os valores de densidade do solo são intermediários entre SPC e SPD, e diferentes de ambos, associados ao revolvimento parcial do solo pelo escarificador. Os autores observaram ainda, que a densidade do solo foi maior no SPD, em virtude do efeito cumulativo do tráfego de máquinas e ausência de mobilização mecânica do solo.

Czyż e Dexter (2009) detectaram maior valor de densidade do solo na camada 0,10 - 0,20 m em área manejada sob SPD do que em SPC e CM, porém, após sete anos a densidade do solo apresentou redução, devido ao acúmulo de matéria orgânica ao longo do tempo.

O manejo incorreto do solo pode provocar a compactação, alterando a estruturação e a densidade do solo. Assim, Rabelo et al. (2000) afirmaram que quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será a sua compactação, menor será a sua estruturação, menor a sua porosidade total e maiores serão as restrições impostas ao crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas.

c) DENSIDADE DA PARTÍCULA

A densidade da partícula refere-se ao volume de sólidos de uma amostra de terra, sem considerar a porosidade. Pode ser entendida como a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas (GUBIANI et al., 2006).

Esta densidade depende da composição química e mineralógica do solo, e não inclui a porosidade nem varia com o manejo. Em solos, a densidade da partícula é importante para se conhecer sua composição. Se o solo apresentar grandes quantidades de minerais mais densos, como a magnetita, sua densidade de partícula será elevada; se, ao contrário, apresentar maior quantidade de matéria orgânica, mais leve, portanto, sua densidade de partículas será menor (ZORZETO et al., 2014). Os valores médios para a densidade da partícula variam entre 2,30 e 2,90 kg dm⁻³ (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

d) POROSIDADE

O espaço do solo não ocupado por sólidos e ocupado pela água e ar compõem o espaço poroso, definido como sendo a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo. É inversamente proporcional à densidade do solo e de importância direta para o crescimento de raízes e movimento de ar, água e solutos no solo (SUZUKI et al., 2008).

Modificações significativas que ocorrem em decorrência da compactação provocarão alterações na relação solo-água-ar, e conseqüentemente do crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KIM et al., 2010). As alterações na porosidade são das mais significativas neste processo, e este atributo é utilizado para avaliar o impacto dos sistemas de preparo e manejo do solo (CARNEIRO et al., 2009).

A ação das máquinas e implementos agrícolas e do pisoteio intensivo em sistemas conservacionistas pode degradar o solo e reduzir o aporte de matéria orgânica e a agregação, favorecendo a compactação. Com isso, há aumento da densidade e a resistência a penetração, reduzindo a porosidade total, principalmente a macroporosidade (MOREIRA et al., 2014).

Desta forma, Oliveira et al. (2015) ressaltaram que a porosidade total é um importante atributo com capacidade de indicar a qualidade do solo, já que maiores porosidades se refletem em condições onde o solo não se alterou, devido à pressão exercida pelo tráfego de máquinas e pelo seu revolvimento.

Segundo Fiori & Carmignani (2001), a porosidade total dos solos pode ser conceituada conforme classificação: baixa, para $PT < 35\%$; média, quando $35 \leq PT < 40\%$; alta, para $40 \leq PT < 50\%$ e muito alta, se $PT \geq 50\%$.

Sobrinho e Ross (2007) analisaram a porosidade e a densidade num Luvissole com plantio de milho e feijão, em pousio e em mata nativa. Os autores observaram que na área de cultivos a porosidade total esteve em torno de $0,43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na profundidade inicial, enquanto que os demais manejos apresentaram valores próximos a $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Para os autores, é possível que o aumento da densidade do solo e a redução da porosidade total no sistema de plantio convencional estejam relacionados com o menor teor de matéria orgânica, com o processo constante de umedecimento e secagem e com o entupimento de poros devido ao impacto de gotas de chuvas sobre a superfície do solo, em função da ausência de cobertura vegetal nessa área.

e) TEXTURA DO SOLO

A textura do solo é um termo empregado para designar a proporção relativa das frações de argila, silte e areia no solo, as quais diferenciam entre si pelo tamanho de suas partículas (granulometria). Representa uma característica importante para entendimento do comportamento e do manejo dos solos, por determinar o grau de coesão e adesão entre as partículas (SANTOS et al., 2010).

De acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, a areia representa a maior classe das partículas do solo, variando de 2,0 a 0,05 mm, sendo a responsável pela sensação áspera quando se esfrega uma amostra de solo entre os dedos. Ela é bem familiar pois é possível visualizá-la na massa de solo sem auxílio microscópico. O silte tem seu tamanho variando de 0,05 a 0,002 mm e só há possibilidade de visualizá-lo com ajuda de microscópica. Já a argila tem a menor das classes de partículas minerais, com tamanho menor que 0,002 mm. Ela tem como característica a pegajosidade do solo, responsável pela terra que adere à mão quando pegamos uma amostra de solo umedecida e a amassamos (SANTOS et al., 2005).

De acordo com Lepsch et al. (2016), proporções das partículas do solo podem influenciar a taxa de infiltração e retenção de água, na aeração e na disponibilidade de nutrientes. Além disto, a sua determinação no solo permite fazer uso mais coerente e eficiente dos fertilizantes.

A reunião de uma ou mais classes de textura, define os grupamentos texturais que são registrados em notação simples, binária ou ternária.

Segundo Embrapa (2018), são utilizados os seguintes grupamentos texturais:

- Textura arenosa – material que compreende as classes texturais areia e areia franca, ou seja, teor de areia menos teor de argila maior que 700 g kg^{-1} ;
- Textura média – material com menos de 350 g kg^{-1} de argila e mais de 150 g kg^{-1} de areia, excluídas as classes texturais areia e areia franca;
- Textura argilosa – material com conteúdo de argila entre 350 g kg^{-1} e 600 g kg^{-1} ;
- Textura muito argilosa – material com conteúdo de argila superior a 600 g kg^{-1} ;
- Textura siltosa – material com menos de 350 g kg^{-1} de argila e menos de 150 g kg^{-1} de areia.

A textura do solo é uma das principais propriedades físicas justamente por ser uma das mais estáveis, não se modificando significativamente ao longo do tempo ou através da utilização de práticas agrícolas diversas, mesmo nas camadas superficiais (MONIZ et al., 1975). Os solos não são constituídos somente por uma fração, mas da combinação de areia, silte e argila.

A proporção das partículas do solo não é uma característica que se altere com facilidade ou rapidez no tempo, por isso é considerada uma característica básica do solo (Brady, 1989), fazendo com que esta não precise ser repetida a cada safra junto à análise de fertilidade do solo.

f) RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

A resistência do solo à penetração (RSP) é uma estimativa do impedimento mecânico que o solo oferece às raízes, sendo um dos mais comumente citados fatores físicos que afetam o crescimento das raízes (SILVA et al., 2008a).

De acordo com Junior et al. (2014), a resistência do solo à penetração é um atributo eficiente na identificação de camadas compactadas, utilizada ao longo de muitos anos. Já está consolidada em diversas áreas da pesquisa agrônômica, como: detecção de camadas compactadas, estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento.

A resistência do solo à penetração, além da dependência de fatores intrínsecos do solo (textura, estrutura e mineralogia), é altamente dependente da umidade do solo (SILVA & ROSOLEM, 2002). Em condição de baixa umidade ocorre maior resistência

à deformação ou à penetração de raízes. Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, incorrendo em redução da resistência do solo à penetração (CUNHA et al., 2002).

Os sistemas de plantio têm provocado a compactação superficial do solo, que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo, segundo Carvalho et al. (2011). Em consequência, há aumento da resistência mecânica do solo e redução da macroporosidade, da porosidade e da disponibilidade de água, reduzindo, conseqüentemente, o crescimento e o desenvolvimento radicular das culturas (STRECK et al., 2004).

A resistência do solo à penetração é um importante indicador da qualidade física dos solos cultivados. Mediante monitoramento periódico de áreas agrícolas, com penetrômetro, determina-se facilmente o grau de compactação do solo e a condição de penetração das raízes (RIBON et al., 2003).

A maioria dos trabalhos adotam a seguinte classificação da RSP, estabelecida por Canarache (1990):

- Muito baixa e sem limitação: $RSP < 1,1$ MPa;
- Baixa e com pouca limitação: $1,1 \leq RSP < 2,5$ MPa;
- Média e com alguma limitação: $2,6 \leq RSP < 5,0$ MPa;
- Alta e com sérias limitações: $5,1 \leq RSP < 10,0$ MPa;
- Muito alta e as raízes praticamente não crescem: $10,1 \leq RSP < 15,0$ MPa;
- Extremamente alta e as raízes não crescem: $RSP \geq 15,0$ MPa.

Ressalta-se o fato de que, embora a adoção de tais limites para a resistência do solo à penetração, grande parte das raízes se desenvolvem em solos com valores de RSP acima dos citados, em virtude da capacidade de explorarem zonas de menor resistência. Com isso, as raízes modificam sua morfologia, com desenvolvimento de raízes laterais mais finas, as quais procuram pontos de menor resistência (TAVARES FILHO et al., 2001).

Bergamin et al. (2010), em estudos sobre a anatomia radicular de milho em solo compactado concluíram que o grau de compactação afeta a anatomia radicular, e a resistência à penetração é o indicador físico que melhor expressa esse efeito.

Em estudos sobre o efeito da interação entre o crescimento radicular de plântulas de milho e a resistência do solo à penetração, realizados por Rosolem et al. (1999) em Latossolo Vermelho-Escuro álico e Latossolo Roxo Álico, mostraram que a

resistência do solo à penetração de 1,3 MPa reduz à metade o crescimento das raízes seminais adventícias do milho.

Freddi et al. (2006) verificaram que valores entre 0,90 a 2,00 MPa, em Latossolo Vermelho de textura argilosa, não reduziram a produtividade da cultura do milho. De maneira geral, considera-se que 2,0 MPa seja o valor crítico de resistência do solo ao crescimento radicular (TAYLOR et al., 1966).

2.4 Correlação entre os coeficientes de rendimento das culturas e os atributos do solo

Os coeficientes de rendimento das culturas apresentam variabilidade espacial, que pode ser atribuída a um número bastante grande de fatores, tais como: atributos do solo, taxa de germinação, plantas daninhas, pragas e doenças, entre outros. Tais fatores influenciam na eficiência do manejo e no desenvolvimento das culturas (ACOCK & PACHEPSKY, 1997).

A variabilidade dos coeficientes de rendimento e produtividade das culturas acompanha a do solo, e é imprescindível conhecer quais atributos exercem as maiores influências (MARQUES JÚNIOR et al., 2000). Dessa forma, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de caracterizar e estudar a correlação entre atributos do solo e produtividade das culturas (AMADO et al., 2004; SIMÕES et al., 2006; SANTOS et al., 2006; SHIRATSUCHI et al., 2007; RODRIGUES et al., 2012).

Amado et al. (2004) numa lavoura de 57 hectares, em uma área com fertilidade do solo considerada adequada para o desenvolvimento das culturas analisadas, encontraram diferenças de rendimento de 25 a 70 sacos por hectare de soja e de 75 a 150 sacos por hectare de milho, demonstrando a grande amplitude de variação da produtividade, indicando dessa forma, a necessidade de se levar em conta a variabilidade existente no manejo da área.

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, os autores se certificaram de que a avaliação da variabilidade espacial desses atributos é uma importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo que visam aumentar a produtividade agrícola. Estudando a relação entre produtividade de milho e densidade de partícula do solo, densidade do solo e porosidade total, em um Latossolo Vermelho

distroférico, Santos et al. (2006) observaram baixas correlações lineares e espaciais entre os atributos do solo e a produtividade da cultura.

Shiratsuchi et al. (2007) afirmaram que é comum observar, em talhões de grandes propriedades agrícolas comerciais, zonas de baixa produtividade onde ocorrem níveis considerados altos de fertilidade do solo. Uma das hipóteses para explicar a ocorrência de baixas correlações entre atributos do solo e produtividade das culturas pode estar relacionada com a intensidade com que é realizada a amostragem desses fatores. Comercialmente, profissionais têm utilizado uma amostra por hectare até uma a cada 20 a 25 hectare (RODRIGUES et al., 2012).

Estudos realizados por Rodrigues et al. (2012), confirmaram relação de dependência espacial entre as propriedades do solo e a produtividade da cultura do milho. Segundo os autores, é observada correlação entre os padrões de distribuição espacial quando a intensidade amostral dos atributos do solo é semelhante àquela da produtividade da cultura.

Apesar de reconhecer a possibilidade de detectar e manejar a variabilidade de muitos atributos, como produtividade e qualidade da cultura, tipo de solo e nutrientes, e manejos integrados, Dampney e Moore (1999) afirmaram que o mapeamento confiável e não oneroso desses atributos apresenta muitos desafios. Neste sentido, dados de produtividade e de amostras regionalizadas de solo têm sido utilizados para estudar a correlação entre a variabilidade de propriedades do solo e a produtividade de culturas (COELHO et al., 1999).

É importante entender como a variabilidade espacial dos atributos do solo conjuntamente (físicos e químicos) influenciam a produtividade das culturas para que as decisões de manejo sejam tomadas de forma a minimizar ao máximo os efeitos dessa variabilidade nas produtividades (GUEDES FILHO et al., 2010).

2.5 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão compreende o desenvolvimento e a adoção de técnicas que visam a melhoria do gerenciamento de sistemas de manejos agrícolas, com a finalidade de otimizar aplicações de fertilizantes, pesticidas e sementes, sempre com o objetivo de maximizar a produção agrícola (BRAMLEY et al., 2008).

A partir desta ideia, é possível se tomar decisões e definir estratégias diferentes para cada parte, considerando suas particularidades, de modo a contribuir para o

aumento da produtividade. As áreas de produção podem ser georreferenciadas e tratadas de maneira diferenciada uma vez que a cultura é perene e vem sendo cultivada em talhões com áreas relativamente pequenas (QUEIROZ et al., 2004).

De acordo com Antolini et al. (2015), o estudo da adoção de inovações na agricultura iniciou-se na década de 1950 a 1960. A partir de 1980, a descoberta de novas tecnologias, como o computador, softwares de sistemas de informações geográficas, sensores e técnicas de produção tornaram viável a utilização das técnicas de agricultura de precisão.

Colvin et al. (1996) relataram que algumas dessas tecnologias começaram a aparecer no ano de 1989, quando o Sistema de Posicionamento Global, o GPS, passou a ser liberado para uso civil de forma ilimitada, o que possibilitou o crescimento das coletas de informações espacializadas.

Segundo Queiroz et al. (2000), até o início dos anos 90, as pesquisas em agricultura de precisão concentraram-se no desenvolvimento de sensores. Dessa forma, eram montados dispositivos nas máquinas de aplicação que comandam as decisões de variação da aplicação, processando os dados dos sensores existentes e os dados inseridos pelo usuário, aplicando, portanto, a dose necessária.

Em 2000, o governo norte americano eliminou um erro proposital no sinal de GPS, o que fez com que as tecnologias de agricultura de precisão se popularizassem ainda mais, uma vez que, antes disso, correções diferenciais eram necessárias àqueles que utilizavam o sinal de GPS. Com a eliminação do ruído, os equipamentos de agricultura de precisão ficaram mais baratos, o que auxiliou no aumento da sua utilização (MOLIN et al., 2015).

A melhor informação do resultado de uma lavoura é a colheita. Na agricultura tradicional a informação sobre a produtividade restringe-se a um valor da média de determinado talhão da propriedade agrícola. Na agricultura de precisão essa informação é o mapa de produtividade de cada porção da lavoura. É uma imagem que representa a variabilidade espacial da produção (MOLIN & CASTRO, 2008).

Segundo Bramley et al. (2008), a agricultura de precisão pressupõe a elaboração e a utilização de mapas que descrevem as características e as propriedades de certa área. Tais mapas representam espacialmente a variabilidade de propriedades do solo, produtividade e características observadas em campo.

Com base nas informações contidas nos mapas, são tomadas as decisões que envolvem o manejo localizado dessas áreas. Nesse sentido, é possível estabelecer

uma complementaridade dessas informações para identificar áreas homogêneas (KING et al., 2005). Desta forma, os mapas de produtividade se tornaram uma alternativa moderna para gerenciar a variabilidade espacial e temporal de lavouras comerciais, orientando práticas de manejo (MILANI et al., 2006).

Segundo Molin e Castro (2008), após apontar as causas e efeitos que determinam a variabilidade na produtividade das culturas, é necessário intervir de maneira localizada, a fim de eliminar ou amenizar tais limitantes. Assim, os mapas de produtividade definem a variabilidade espacial da produção de uma cultura no campo, mas não explicam a variabilidade observada (COELHO, 2003), ou seja, indicam as regiões de baixa e alta produtividade, porém não explica as causas de tal variação.

Para tanto é necessário o estudo dos fatores que afetam a variação da produtividade. Dentre estes fatores estão os atributos do solo, que por sua vez, não possui tal facilidade para obtenção de dados, sendo um processo muito mais oneroso.

2.6 Estatística Descritiva

De acordo do Carvalho et al. (2002), a estatística clássica assume que a variação das propriedades do solo entre as unidades amostrais não tem correlação e que a média amostral é o melhor estimador das características do solo em qualquer local dentro da unidade amostral, com um erro estimado expresso pela variância.

Isaaks & Srivastava (1989), relataram que a análise descritiva geral leva em conta os valores obtidos sem considerar sua posição na área amostrada. Pressupõe a aleatoriedade e independência dos valores amostrais. Assim, a forma da distribuição dos dados é descrita pelo coeficiente de assimetria, fornecendo informação sobre o quanto sua curva de frequência se afasta da posição simétrica, e pelo coeficiente de curtose, que avalia a dispersão dos valores em torno de medidas de tendência central

Dessa forma, os autores salientaram, ainda, que a verificação de normalidade deve ser inicialmente realizada pelos coeficientes de assimetria e curtose, pois indicam a proximidade entre a distribuição dos dados e a distribuição normal. Ainda assim, de acordo com Guimarães et al. (2010), expressivos afastamentos da normalidade, evidenciam apenas que na natureza não são encontradas distribuições que sejam absolutamente normais.

Como os valores da média, na estatística clássica, são usados para estimar as propriedades em locais não amostrados, as medidas de dispersão são usadas para

indicar a precisão da média como estimador. E uma medida de dispersão muito utilizada para avaliar a variabilidade de um conjunto de dados é o coeficiente de variação, que de acordo com Camargo et al. (2008), possibilita comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial.

Lima et al. (2012) afirmaram que as medidas de posição e dispersão são bastante sensíveis à presença de *outliers*, interpretados como dados discrepantes, de forma que a verificação de ocorrência destes, deve preceder as demais etapas da análise de variabilidade.

Já Trangmar et al. (1985) afirmaram que a variabilidade da média é ao acaso e não contém referências à distribuição espacial das unidades amostrais, assim, a estatística clássica assume que o valor esperado de uma propriedade do solo z em qualquer lugar x em uma área amostrada pode ser expresso segundo o modelo na Equação 1:

$$z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (1)$$

onde:

- μ é a média esperada da população ou o valor esperado de z ;
- $\varepsilon(x)$ representa uma dispersão não correlacionada espacialmente e ao acaso dos valores da média.

Ainda segundo os autores, as propriedades do solo apresentam dependência espacial dentro de algumas regiões, assim, o modelo clássico é inadequado quando o interesse é a interpolação de variáveis com dependência espacial. Isto, devido ao fato do modelo assumir que a variação se deve ao acaso e não levar em conta a correlação espacial, nem a localização relativa das amostras. Em complemento, Souza et al. (2001) afirmaram que muitas propriedades dos solos variam continuamente no espaço, ou seja, os valores localizados próximos entre eles apresentam maior similaridade do que aqueles que estão mais distantes, apresentando uma dependência espacial.

Segundo Bailey e Gattrel (1995) a ideia da análise exploratória de dados espacializados é aprofundar a compreensão do processo que os deu origem, ou seja, avaliar evidências de hipóteses a ele relacionadas, ou ainda, tentar prever valores em áreas onde as observações não estão disponíveis.

Dessa forma, Aquino et al. (2015) afirmaram que para a aplicação dos procedimentos geoestatísticos é fundamental uma análise exploratória prévia e a compreensão dos instrumentos e conceitos utilizados, tais como: modelagem probabilística, descrição e modelagem da estrutura da variabilidade espacial e verificação da distribuição espacial para cada uma das variáveis, obtendo-se mapas que representam os valores das propriedades em estudo na área.

Souza et al. (2001), concluíram que, as duas ferramentas estatísticas, a clássica e a geoestatística, não são concorrentes e se complementam, obtendo no primeiro caso, a magnitude da variação e, no segundo, a estrutura da variabilidade.

Cabe ressaltar que a geoestatística não exige normalidade dos dados para ser aplicada, porém ocorrendo, permite-se observar maior precisão das estimativas da krigagem por meio de seus valores médios (VIEIRA, 2000).

2.7 Análise de correlação

A correlação é uma grandeza que avalia o grau de associação existente entre duas variáveis e pode ser interpretada por um coeficiente que avalia o quanto duas variáveis tendem a mudar juntas.

De acordo com Steel & Torrie (1986), o coeficiente de correlação linear de Pearson exprime o grau de relação existente entre duas variáveis através de valores situados entre -1 e 1. Uma correlação é chamada positiva, quando o valor de uma das variáveis aumenta e o da outra também aumenta e, chamada de correlação negativa, quando o valor de uma variável aumenta e o da outra diminui. Quando o coeficiente de correlação de Person se aproxima de zero, as variáveis não apresentam relação linear, e quanto mais os valores se aproximam de 1 ou -1, mais forte é a relação.

Em estudos de campo, sem o controle de variáveis, o que se espera dessa análise são indicadores de tendências, pois geralmente, em situações de análise de dados georeferenciados, a dispersão é alta e os valores dos coeficientes de correlação de Pearson são baixos (STEEL & TORRIE,1986).

2.8 Análise Geoestatística

A etimologia do termo Geoestatística representa o estudo estatístico de fenômenos naturais. De maneira mais objetiva, a Geoestatística é um ramo da

Estatística Espacial que usa o conceito de funções aleatórias para incorporar a dependência espacial nas análises estatísticas. Inicialmente, isso se deve ao fato de que Krige (1951), ao trabalhar com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância era insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, é necessário levar em consideração a distância entre as observações, ou seja, considerar a localização geográfica e a dependência espacial.

Baseado nas observações de Krige, Matheron (1963) desenvolveu uma teoria a qual chamou de Teoria das Variáveis Regionalizadas, definida como uma função espacial numérica que varia de um local para outro, com certa continuidade, onde sua variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Tal continuidade, denominada dependência espacial, representa uma relação de vínculo existente entre o valor de uma variável localizada em uma determinada área, com os valores de suas amostras vizinhas. A medida do grau de dependência espacial entre duas amostras é chamada semivariância.

O gráfico das semivariâncias em função da distância h entre duas amostras é chamado de semivariograma, ferramenta geoestatística utilizada para estimar a variabilidade espacial. O semivariograma se baseia na estatística considerando as coordenadas geográficas dos pontos amostrados. Sendo assim, quanto mais próximos estão dois pontos, menor a probabilidade de variância entre os valores (ASSUMPÇÃO et al., 2007).

Entre distâncias maiores, a variabilidade é maior até não mais ocorrer dependência espacial da variável entre os pontos, ou seja, em uma certa distância as variáveis de um ponto não interferem nas mesmas variáveis de outro ponto (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O semivariograma permite a interpolação dos dados para locais não amostrados através de determinados métodos de regressão, gerando mapas de isolinhas da característica estudada. Assim, encontrar a variabilidade dos atributos em todas as porções do terreno tem se mostrado uma ferramenta para uso na agricultura, e é possível mediante a amostragem georreferenciada do solo (LIMA et al., 2010).

Segundo Oliver (1999), a variação espacial das propriedades do solo pode ser descrita usando-se a teoria e os métodos geoestatísticos. O semivariograma, sua ferramenta central, fornece uma descrição imparcial da escala e padrão de variação espacial. Ele efetua isto, medindo o grau de correlação ou dependência espacial entre os pontos amostrados, baseado na noção de que as propriedades do solo são mais

prováveis de serem similares entre localizações vizinhas do que entre aquelas distantes entre si.

Essa ferramenta geoestatística que possibilita a detecção e análise da estrutura e dependência espacial na variação dos atributos, conhecida como semivariograma e representada por $\gamma(h)$, é apresentada por Isaaks & Srivastava (1989) segundo modelo descrito na Equação 2:

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

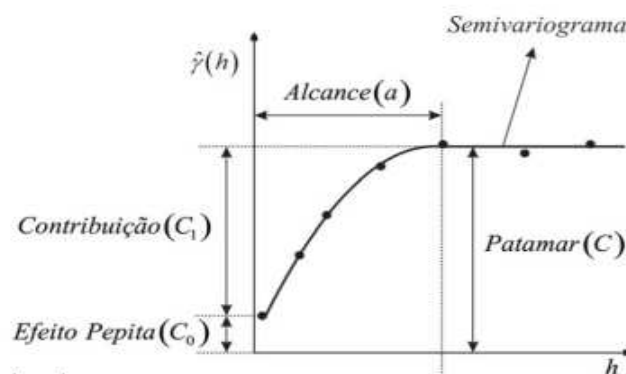
onde:

- h representa cada distância considerada entre quaisquer dois pontos;
- $N(h)$ é o número de pares formados separados por uma distância h ;
- x_i e $x_i + h$ são locais de amostragem separados por uma distância h ;
- $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são valores medidos da variável nos locais correspondentes.

Geometricamente, o semivariograma representa um gráfico no plano cartesiano onde o eixo das abscissas representa a distância h entre os pontos e, o eixo das ordenadas, representa as estimativas para a semivariância associadas às distâncias.

Para cada variável regionalizada tem-se: o semivariograma empírico, que é aquele obtido por meio de amostras dos pontos disponíveis das variáveis locais e; o semivariograma teórico, que tem suas propriedades conhecidas e se difere do empírico pelo fato de ser descrito por um modelo matemático, utilizado para ajustar o semivariograma empírico. Na Figura 1 estão representados os semivariogramas empírico e teórico (com seus parâmetros).

Figura 1 – Semivariograma empírico (pontos) e semivariograma teórico (linha contínua) da distância de separação entre pares de pontos (h) em função da semivariância $\gamma(h)$



Fonte: Adaptado de Isaaks e Srivastava (1989)

A partir do semivariograma empírico é realizado o ajuste de um modelo teórico de semivariograma, que visa obter estimativas de alguns parâmetros para auxiliar a escolha do modelo teórico que melhor se ajustar.

O Alcance (a) pode ser interpretado como sendo a menor distância a partir da qual o valor da semivariância permanece constante, ou seja, a distância h dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Ele determina a distância máxima para o uso de vizinhos na interpolação, assim, aqueles pontos que estiverem separados por uma distância maior que o alcance, estarão de fora da relação. Ele representa a linha que separa o uso da Estatística Clássica, que pode ser utilizada para distâncias maiores que o alcance, da Geoestatística, usada para distâncias menores que o alcance, onde as amostras são correlacionadas e podem ser utilizadas para interpolação dos locais não amostrados (VIEIRA, 2000).

A dependência espacial das amostras é representada pelo alcance (a) definido pela distância (h) em que a semivariância $\gamma(h)$ se torna praticamente constante. Este alcance (a) caracteriza o raio de abrangência da dependência espacial da amostra. A partir da distância correspondente ao alcance, onde a dependência espacial não existe, pode-se dizer que a distribuição espacial acontece aleatoriamente, e uma amostra não exerce influência sobre a outra (MACHADO et al., 2007).

O Patamar (C), pode ser interpretado como o valor da semivariância correspondente ao Alcance (a). A medida de semivariância $\gamma(h)$ no momento em que se torna constante, mesmo com aumento da distância (h), é denominada patamar (C) que é composto pelo efeito pepita (C_0) e pela contribuição (C_1) (VIEIRA, 1997).

O Efeito pepita (C_0) é o valor onde a função intercepta o eixo das ordenadas, representando uma descontinuidade da origem. O valor da semivariância no ponto $h = 0$ é nula, visto que a variância de um valor amostrado com ele mesmo é zero. A Contribuição (C_1) é a diferença entre o Patamar (C) e o Efeito pepita (C_0).

De acordo com Guerra (1988), através do Patamar (C) e do efeito pepita (C_0) é possível determinar o grau de aleatoriedade (E) presente nos dados em relação a sua regionalização, que pode ser interpretado como: $E < 0,15$, a componente aleatória é pequena; $0,15 \leq E \leq 0,30$, significativa; e $E > 0,30$, muito significativa.

Existem situações onde o semivariograma não apresenta patamar, e até mesmo o efeito pepita e o patamar apresentam valores praticamente iguais ao longo

da distância (h), sendo que neste último caso, não existe dependência espacial (GUIMARÃES, 2004).

O índice de dependência espacial é dado pela proporção ocupada pelo efeito pepita (C_0) dentro do patamar (C) e pode ser classificado de acordo com a sugestão de Cambardella et al. (1994), como:

- Dependência espacial forte: $\left(\frac{C_0}{C_0+C_1}\right) \times 100 \leq 25\%$
- Dependência espacial moderada: $25\% < \left(\frac{C_0}{C_0+C_1}\right) \times 100 < 75\%$
- Dependência espacial fraca: $\left(\frac{C_0}{C_0+C_1}\right) \times 100 \geq 75\%$

Semivariogramas simples permitem verificar a dependência espacial de determinada variável, mas para verificar a correlação espacial entre duas variáveis utiliza-se do semivariograma cruzado, que tem por objetivo descrever a variação espacial simultânea de duas variáveis aleatórias (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Segundo com Vieira (2000), o semivariograma cruzado é uma importante ferramenta no estudo da variabilidade dos atributos do solo, já que, frequentemente observa-se que existem variáveis que se correlacionam espacialmente entre si. Assim, conhecendo a correlação espacial dessas variáveis, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas, expressas no semivariograma cruzado pelo método chamado de cokrigagem.

De forma geral, tal técnica é aplicada quando uma variável é dispendiosa de ser amostrada, contudo possui correlação com outra que é de mais fácil amostragem, permitindo desta forma, realizar uma amostragem menos intensa para a variável dispendiosa. Nesta técnica a variável com menor número de amostras é chamada de variável principal e a com maior número de amostras de covariável (VIEIRA, 2000).

Na literatura encontram-se descritos diversos modelos matemáticos que devem ser ajustados ao semivariograma para possibilitar outras aplicações, sendo os mais utilizados: Modelo Esférico, Modelo Exponencial e Modelo Gaussiano (ANDRADE et al., 2005). Na literatura são encontrados diversos métodos que buscam a seleção do melhor modelo que se ajusta ao semivariograma teórico. Alguns deles têm como pilar, o encontro de maiores valores de coeficiente de determinação (R^2).

Modelos teóricos de semivariograma são superpostos aos pontos amostrados do semivariograma empírico, de forma que a curva que melhor se ajusta a tais pontos, represente o padrão e o comportamento do fenômeno em estudo (GUIMARÃES,

2004). O melhor ajuste de um modelo teórico ao semivariograma empírico está diretamente ligado à sensibilidade do modelo em detectar a variabilidade espacial das amostras.

O Modelo Esférico é o mais utilizado. Ele é recomendado em situações que apresentam crescimento rápido na origem, onde tem comportamento linear.

O Modelo Esférico é obtido através da função, definida na Equação 3:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } h=0 \\ & \text{se } 0 < h < a \\ C_0 + C_1, & \text{se } h \geq a \end{cases} \quad (3)$$

Outro modelo muito utilizado é o Modelo Exponencial. Ele é recomendado em situações que atingem o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância em que a semivariância apresenta valor igual a 95% do patamar (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O Modelo Exponencial é obtido através da função, definida na Equação 4, que segue:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{3h}{a} \right) \right], & \text{se } h \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

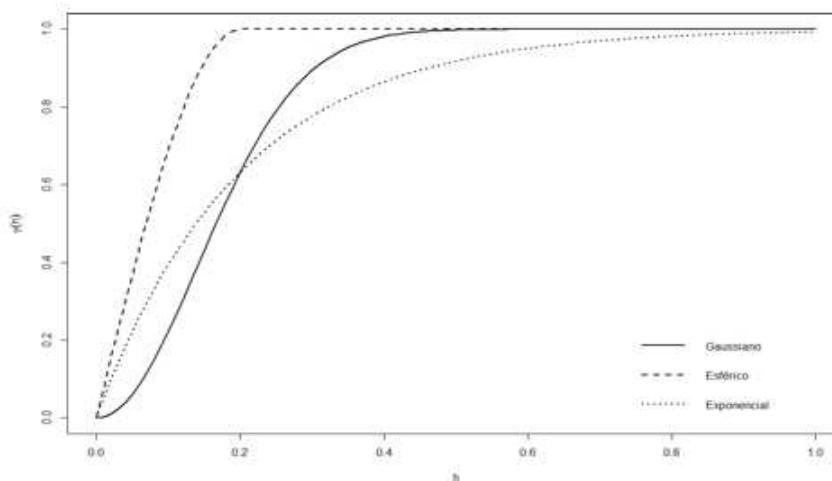
O Modelo Gaussiano é muito semelhante ao modelo exponencial, pois também atinge o patamar assintoticamente. Apresenta um comportamento parabólico na origem e tem como particularidade, possuir ponto de inflexão (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O Modelo Gaussiano é obtido através da função, definida na Equação 5:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{3h^2}{a^2} \right) \right], & \text{se } h \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Exemplos de curvas referentes aos três modelos citados, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Modelos teóricos de semivariograma da distância de separação entre (h) em função da semivariância $\gamma(h)$



Fonte: Adaptado de Guimarães (2004)

Observa-se que a curva representada pelo Modelo Gaussiano apresenta um comportamento parabólico próximo à origem e representa um fenômeno contínuo. Já as curvas representadas pelos Modelos Esférico e Exponencial, apresentam um comportamento linear perto da origem.

Outro fator de importância relevante é a verificação do fenômeno denominado anisotropia, que consiste na direção da variabilidade espacial, ocasionada quando o semivariograma apresenta distintos padrões de dependência espacial em diferentes direções. Uma forma de detectá-la é através da observação dos semivariogramas obtidos para diferentes direções. A correção da anisotropia geométrica permite uma maior precisão na construção de mapas temáticos que descrevem a variabilidade espacial dos atributos do solo (GUEDES et al., 2013).

O ajuste de um modelo de semivariograma teórico é muito importante pois é a etapa que irá definir a estrutura final de variabilidade, transmitindo informações sobre o comportamento do fenômeno pesquisado. Os semivariogramas, com seus modelos devidamente ajustados, são necessários para o processo de interpolação, onde são estimados dados em toda a superfície, entre todos os pontos amostrados na interpolação (GREGO & VIEIRA, 2005).

De acordo com Gonçalves et al. (2001), a interpolação é a técnica de estimar pontos de locais não amostrados a partir de pontos amostrados. Ela tem um papel fundamental na agricultura de precisão, pois é por meio da interpolação que é possível confeccionar os mapas de isolinhas, como os de produtividade das culturas e atributos do solo. Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade,

estão disponíveis na literatura, entretanto, os métodos utilizados com maior destaque são a krigagem e o inverso do quadrado da distância (SILVA et al., 2008b).

No método do inverso do quadrado da distância o fator de ponderação, como o nome já indica, é o inverso do quadrado da distância euclidiana entre o ponto conhecido e o estimado. Esse método é considerado simples e de fácil aplicação, no entanto menos acurado que a krigagem, uma vez que não considera o padrão da estrutura da dependência espacial (SILVA et al., 2008b).

O termo krigagem deriva do nome de Daniel Gerhardus Krige e diferencia-se dos outros métodos de interpolação pela forma como os pesos são distribuídos nas diferentes amostras, determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Para se utilizar a Krigagem é necessário que exista dependência espacial entre as amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000).

Muitos estudos têm mostrado a eficiência da krigagem e sua superioridade em comparação aos outros métodos de interpolação lineares (KRAVCHENKO & BULLOCK, 1999; SHIRATSUCHI, 2003; CORÁ et al., 2004; SILVA et al., 2008b; COELHO et al., 2009). Kravchenko e Bullock (1999) demonstraram que a ponderação do inverso do quadrado da distância é mais fácil de se realizar. Por outro lado, a Krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos dados e produz valiosa informação sobre a distribuição da estimativa do erro.

Para a confecção de mapas de produtividade de milho, SHIRATSUCHI (2003) verificou que o método da Krigagem foi melhor que o método do inverso do quadrado da distância. Corá et al. (2004) consideraram que a krigagem é o método que proporciona maior confiabilidade na estimativa de valores em pontos sem amostragem e, conseqüentemente, maior precisão na elaboração de mapas.

Objetivando o mapeamento dos atributos capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V), Silva et al. (2008b) compararam o método Krigagem com o método do inverso do quadrado da distância e verificaram que, apesar de apresentarem pequena diferença com relação ao mapeamento desses dois atributos, o método do inverso do quadrado da distância apresentou maior erro em comparação com a Krigagem.

Para Coelho et al. (2009), apesar de que, com o método da Krigagem serem obtidos os melhores resultados em comparação com os interpoladores lineares, para

utilizar todo o potencial da Krigagem e esse método ser recomendado, é necessário ter muitos pontos para que um adequado semivariograma seja estimado.

De acordo com Vieira (2000), a determinação de valores entre os pontos é possível mediante interpolação dos resultados encontrados nos pontos vizinhos, sendo a krigagem uma ferramenta muito eficiente para tal finalidade, pois estima valores em qualquer posição dentro do terreno, sem tendência e com variância mínima e usa um conjunto de técnicas de regressão linear para minimizar a variância da estimação. Assim, verifica-se que a Krigagem é confiável para obtenção de mapas de isolinhas de atributos do solo e esse método de interpolação se faz mais eficiente desde que os semivariogramas sejam estimados corretamente e a intensidade amostral da variável em estudo seja adequada.

Existem diversos tipos de krigagem, onde o uso depende do objetivo do estudo. Os tipos mais utilizados são a krigagem simples e a krigagem ordinária. A krigagem simples é utilizada quando a média é estatisticamente assumida como constante para toda a área e, a krigagem ordinária por sua vez, considera a média flutuante ou móvel por toda a área (KAMIMURA et al., 2013).

Assim, os métodos de interpolação são ferramentas imprescindíveis pois os resultados gerados pelos diferentes métodos podem subestimar ou superestimar o valor do atributo em estudo (COUTO et al., 2002). Nesse sentido, a qualidade da estimação depende tanto da escolha dos métodos de interpolação, como da aplicação apropriada de métodos indicados para as características dos dados em estudo.

Vários métodos são utilizados para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais bem como da interpolação resultante deles. Vieira et al. (1983) sugeriram método de ajuste por tentativa e erro (ajuste a critério do observador) associado à avaliação do modelo pela técnica de validação cruzada.

A validação cruzada consiste em retirar-se um ponto do conjunto original de dados e estimá-lo a partir dos restantes; este processo é repetido para todos os pontos estimados. Também são estimados a variância da estimativa e outros parâmetros estatísticos que vão indicar a qualidade do ajuste global da análise geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuarão a krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado por meio de krigagem como se ele não existisse. Para Faraco et al. (2008), dentre vários

métodos de avaliação de ajustes estudados, o da validação cruzada foi o mais adequado para escolha do melhor ajuste do modelo de variabilidade espacial, proporcionando, mapas temáticos mais acurados.

2.9 Número de amostras

Dentro de todo processo de análise do solo, a amostragem é uma das etapas mais críticas, devendo ser feita com bastante atenção. Para realizá-la corretamente, deve-se coletar um número de amostras que seja suficiente e, ao mesmo tempo, representativo (SOUZA et al., 2014).

Um dos fatores que limitam o uso de agricultura de precisão é o número de amostras necessário para representar espacialmente os atributos do solo. Uma variável regional tem um raio de influência que a torna representativa de uma área, assim, quanto menor o raio de influência dessa amostra, maior será o número de amostras necessárias para representar a área de interesse. Assim, os agricultores e as empresas são limitados pelos custos de amostragem, pelo tempo e pelo trabalho gerado (FLATMAN & YFANTIS, 1984).

A amostragem deve ser a menor possível com objetivo de produzir resultados confiáveis na construção de zonas de manejo específico. A forma de amostragem regionalizada e a aplicação de técnicas geoestatísticas procuram dar uma solução para a situação onde a variabilidade do atributo medido pela estatística clássica é muito grande (FLATMAN & YFANTIS, 1984).

A quantidade de amostras coletadas no campo para representar os atributos do solo ainda é uma dúvida frequente entre os usuários da agricultura de precisão. Para a análise geoestatística, um variograma de confiança deve ser construído com um mínimo de 100 a 150 pontos, quando estimado pelo método dos momentos de Matheron (KERRY & OLIVER, 2008).

Em trabalho conduzido por Souza et al. (2014), os autores concluíram que o número de pontos e a distância de amostragem em campo interferiram na análise geoestatística e no detalhamento das informações nos mapas interpolados por krigagem. Com isso, recomendam o mínimo de 100 pontos para viabilizar o uso da geoestatística e da krigagem na elaboração de mapas temáticos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características gerais

O experimento foi conduzido em uma área pertencente ao Núcleo de Agricultura do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, *Campus Barbacena*, localizada no município de Barbacena, MG, na mesorregião Campo das Vertentes, situada na longitude 43° 45' 47" W e latitude 21° 14' 27" S. O solo da região é classificado como Cambissolo Háplico, segundo a classificação realizada pela EMBRAPA (2018).

Foi utilizada uma área experimental de aproximadamente 2,13 ha, onde o relevo é predominantemente montanhoso, com altitude média de 1.200 m. O clima é denominado Cwb temperado e chuvoso (mesotérmico), também chamado subtropical de altitude, classificado de acordo com Köppen (1931). As temperaturas máxima e mínima são 24,4°C e 13,8°C, respectivamente.

A área experimental é utilizada para plantio de milho, e recebe o sistema de plantio direto por 13 anos consecutivos. Para o experimento, ela foi subdividida em três partes, cada uma delas, recebendo um sistema de manejo de solo.

A primeira área de tamanho aproximado 0,87 ha denominada "área 1", recebeu o sistema cultivo mínimo. Em 17/12/2019 houve a aplicação de 1L/ha de glifosato e, em 23/12/2019, foi realizada dessecação da cobertura vegetal, a adubação de 400kg/ha com 08-28-16 de NPK e o plantio. Posteriormente, em 21/01/2020, houve aplicação de uma adubação de cobertura de 410 kg/ha de 30-00-20 de NPK.

Já a segunda área de tamanho aproximado 0,51 ha, denominada "área 2", recebeu o sistema de preparo convencional. Em 04/12/2019 foi realizada uma aração e, em 17/12/2019, duas gradagens. O plantio foi realizado em 23/12/2019, e adubação de 400kg/ha com 08-28-16 de NPK. Em 17/01/2020 foi aplicado 0,5L/ha de glifosato e, em 21/01/2020, a aplicação de uma adubação de cobertura de 410 kg/ha de 30-00-20 de NPK.

A terceira área do experimento de tamanho aproximado 0,743 ha, denominada "área 3", recebeu o sistema de plantio direto. Em 17/12/2020, houve aplicação de 1L/ha de glifosato e, em 23/12/2020, a roçada da área juntamente com o plantio e adubação de 400kg/ha com 08-28-16 de NPK. Posteriormente, em 21/01/2020, houve aplicação de cobertura de 410 kg/ha de 30-00-20 de NPK.

3.2 Caracterização físico-química do solo

A caracterização física e química de um solo é de fundamental importância para a compreensão do seu estado de campo e para a previsão do comportamento da cultura. Tal caracterização foi determinada por meio da coleta de amostras de solo em pontos georreferenciados, cujas análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo e Tecido Vegetal do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, do *Campus Barbacena*. Foram realizados dois processos de amostragem: o primeiro visando a caracterização química e, o segundo, visando a caracterização física.

3.3 A Cultura

A cultura avaliada neste estudo foi o Milho (*Zea mays L.*). Foi utilizado um cultivar de híbrido BM855 PRO2 da Biomatrix, de tecnologia VT PRO2. Suas principais características são: ciclo precoce, variando de 120 a 130 dias; estabilidade produtiva; ampla adaptação geográfica, podendo ser plantado tanto no verão como na safrinha; grãos graúdos semidentados de fácil debulha, utilizado para grãos e/ou silagem de grãos úmidos. O estande após o estabelecimento foi de 65.000 plantas ha⁻¹. Os espaçamentos foram de 0,65 m entre linhas e 4,2 plantas m⁻¹.

3.4 Máquinas e equipamentos utilizados

Para a realização do experimento de campo, foi utilizado um trator agrícola da marca Massey Ferguson, modelo MF 4283 com tração dianteira auxiliar (TDA), com potência máxima de 85 cv (62,50 kW) do motor, pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-34 R1, conforme (Figura 3).

Figura 3 – Trator agrícola utilizado



Fonte: o autor

Para o preparo do solo, foram utilizadas uma grade aradora de 12 discos de 28 polegadas e 1,7 m de largura de corte e uma grade niveladora de 24 discos de 18 polegadas e 1,9 m de largura de corte.

Para a semeadura, foi utilizado uma semeadora-adubadora de plantio direto da marca Semeato de 4 linhas e distribuição de sementes a vácuo, com capacidade total de 600 kg de adubo e 35 litros de sementes por linha, totalizando 140 L (Figura 4).

Figura 4 – Semeadora utilizada



Fonte: o autor

Para aplicação de defensivos agrícolas foi utilizado um pulverizador acoplado ao trator com capacidade de 600 litros, barras hidráulicas com 25 bicos e com espaçamento de 0,50 m entre bicos.

3.5 Coleta de dados

Para o primeiro processo de coleta das amostras de solo, que teve como objetivo caracterizar os atributos químicos, foram georeferenciados pontos nas três áreas utilizadas para ensaiar os três métodos. Foi utilizado um aparelho receptor GPS portátil com antena MediaTech, da marca GARMIN, série eTrex, modelo Summit HC, com correção diferencial pós-processada (Figura 5). Para correção diferencial foram utilizados os dados da base da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE, localizada no município de Viçosa/MG, a uma distância de 107,4 km em linha reta, do município de Barbacena/MG.

Foi utilizado o sistema de coordenadas UTM e o *datum* SIRGAS 2000. A correção foi realizada utilizando o programa computacional GPS TrackMaker Versão 13.9, fornecido pelo fabricante do receptor GPS.

Figura 5 – Aparelho receptor GPS GARMIN eTrex Summit HC



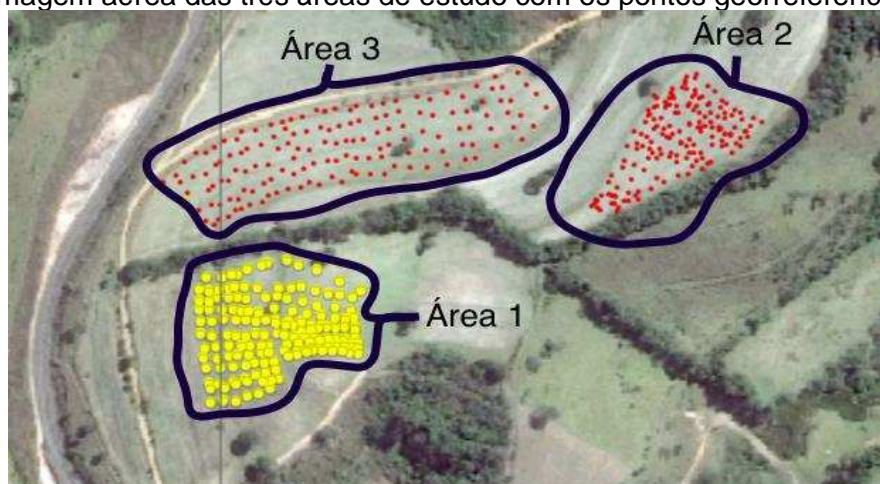
Fonte: o autor

3.5.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Visando a caracterização química do solo foram georreferenciados, através de uma malha irregular e utilizando um processo de amostragem aleatória, o seguinte número de pontos por área experimental: área 1, 164 pontos; área 2, 164 pontos; área 3, 151 pontos, conforme apresentado na Figura 6 a seguir.

O método de amostragem para a caracterização química foi definido por meio de amostras simples e deformadas, coletadas e transferidas para sacos plásticos devidamente numerados, limpos e sem contaminantes, em todos os pontos georreferenciados.

Figura 6 – Imagem aérea das três áreas de estudo com os pontos georreferenciados



Fonte: o autor

As amostras foram coletadas nas datas 30/10/2019, 31/10/2019 e 01/11/2019, antes da implementação dos sistemas de manejo de solo, na profundidade de 0,30 m e com o auxílio de um trado tipo holandês, modelo TP 10, marca Sondaterra, conforme ilustrado na Figura 7 a seguir.

Figura 7 – Trado tipo holandês



Fonte: o autor

Logo após a coleta, os sacos plásticos foram devidamente lacrados e encaminhados para o Laboratório para análise, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Amostras de solo coletadas para análise química



Fonte: o autor

Os atributos químicos avaliados, através de (EMBRAPA, 2017), foram: acidez ativa (pH), fósforo disponível (P), potássio disponível (K), cálcio trocável (Ca^{+2}), magnésio trocável (Mg^{+2}), acidez trocável (Al^{+3}), acidez potencial (H+Al), disponibilidade de fósforo (P-rem), soma de bases (SB), capacidade de troca de

cátions efetiva (t), capacidade de troca de cátions em pH (T), saturação por bases (V) e a saturação por Al^{+3} (m), interpretados com base na recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação (ALVAREZ et al., 1999), de acordo com as Tabelas 1, 2 e 3.

A seguir, é apresentada a Tabela 1 utilizada para a interpretação da disponibilidade para o fósforo e para o potássio de acordo do valor de fósforo remanescente (P-rem).

Tabela 1 - Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo e para o potássio de acordo do valor de fósforo remanescente (P-rem)

P-rem (mg dm ⁻³)	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
	Fósforo disponível (P) (mg dm ⁻³)				
0 – 4	≤ 3,00	3,1 – 4,3	4,4 – 6,0	6,1 – 9,0	> 4,00
4 – 10	≤ 4,00	4,1 – 6,0	6,1 – 8,3	8,4 – 12,5	> 1,50
10 – 19	≤ 6,00	6,1 – 8,3	8,4 – 11,4	11,5 – 17,5	> 2,00
19 – 30	≤ 8,00	8,1 – 11,4	11,5 – 15,8	15,9 – 24,0	> 6,00
30 – 44	≤ 11,0	11,1 – 15,8	15,9 – 21,8	21,9 – 33,0	> 9,00
44 - 60	≤ 15,0	15,1 – 21,8	21,9 – 30,0	30,1 – 45,0	> 8,00
	Potássio disponível (K) (mg dm ⁻³)				
	≤ 15,0	16,0 – 40,0	41,0 – 70,0	71,0 – 120,0	> 120,0

P-rem = fósforo remanescente; P = fósforo disponível; K = potássio disponível.

Fonte: Adaptado de Alvarez et al. (1999)

A seguir, é apresentada a Tabela 2 utilizada para a interpretação da acidez ativa do solo (pH).

Tabela 2 - Classe de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)¹

Classificação química						
Acidez muito elevada	Acidez elevada	Acidez média	Acidez fraca	Neutra	Alcalinidade fraca	Alcalinidade elevada
< 4,5	4,5 – 5,0	5,1 – 6,0	6,1 – 6,9	7,0	7,1 – 7,8	> 7,8

¹pH em H₂O

Fonte: Adaptado de Alvarez et al. (1999)

A seguir, é apresentada a Tabela 3 utilizada para a interpretação da fertilidade do solo para o complexo de troca catiônica.

Tabela 3 - Classes de interpretação de fertilidade do solo para o complexo de troca catiônica

Característica	Unidade	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmolc dm ⁻³	≤ 40	0,41 – 1,20	1,21 – 2,40	2,41 – 4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg ²⁺)	cmolc dm ⁻³	≤ 0,15	0,16 – 0,45	0,46 – 0,90	0,91 – 1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al ³⁺)	cmolc dm ⁻³	≤ 0,20	0,21 – 0,50	0,51 – 1,00	1,01 – 2,00	> 2,00
Soma de bases (SB)	cmolc dm ⁻³	≤ 0,60	0,61 – 1,80	1,81 – 3,60	3,61 – 6,00	> 6,00
Acidez potencial (H+Al)	cmolc dm ⁻³	≤ 1,00	1,01 – 2,50	2,51 – 5,00	5,01 – 9,00	> 9,00
CTC efetiva (t)	cmolc dm ⁻³	≤ 0,80	0,81 – 2,30	2,31 – 4,60	4,61 – 8,00	> 8,00
CTC em pH (T)	cmolc dm ⁻³	≤ 1,60	1,61 – 4,30	4,31 – 8,60	8,61 – 15,0	> 15,0
Saturação por Al ³⁺ (m)	%	≤ 15,0	15,1 – 30,0	30,1 – 50,0	50,1 – 75,0	> 75,0
Saturação por bases (V)	%	≤ 20,0	20,1 – 40,0	40,1 – 60,0	60,1 – 80,0	> 80,0

CTC = Capacidade de troca de cátions

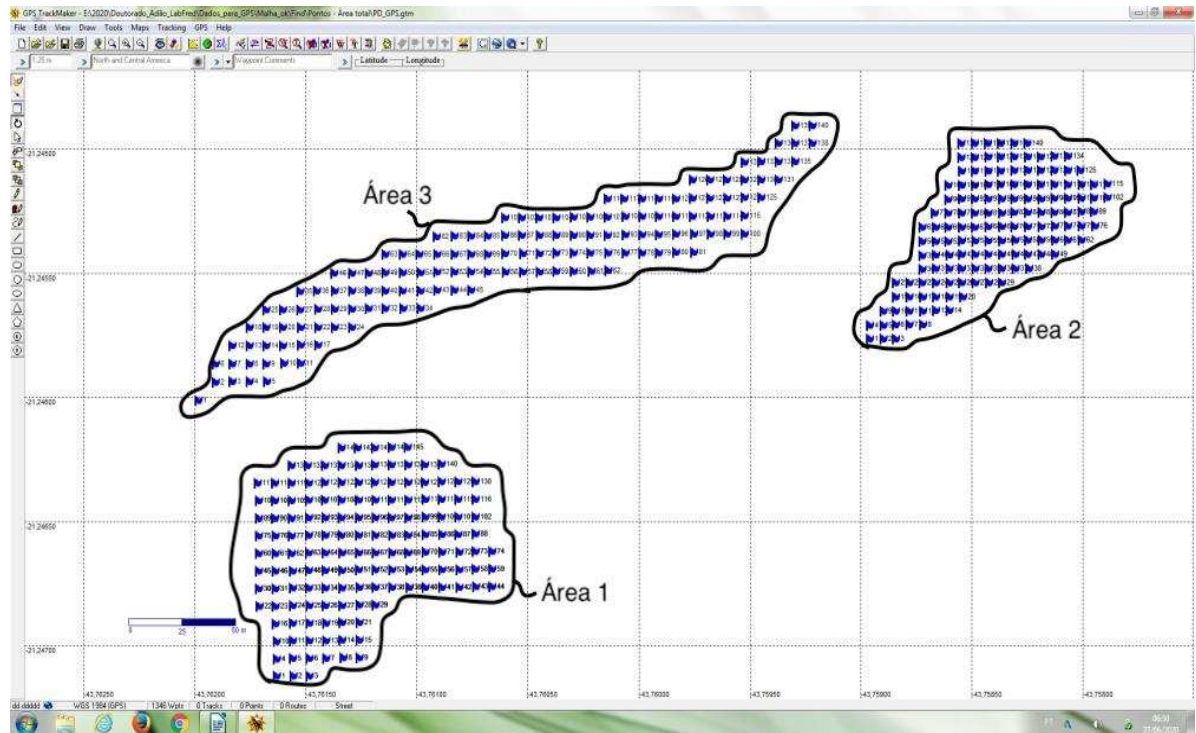
Fonte: Adaptado de Alvarez et al. (1999)

3.5.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

No segundo processo de coleta das amostras de solo, visando a caracterização dos atributos físicos do solo, uma malha amostral regular foi definida de acordo com a dimensão de cada uma das três áreas, visando obter um número aproximado de 150 pontos, em cada uma delas.

Desta forma, de posse dos polígonos que delimitam cada uma das áreas, e utilizando o *software* de sistema de informações geográficas ArcGIS versão 10.1, componente ArcMap, foram definidas as seguintes malhas amostrais com seus respectivos números de pontos: área 1 com malha amostral de 7,8 m x 7,8 m e 145 pontos; área 2 com malha amostral de 6,2 m x 6,2 m e 140 pontos, área 3 com malha amostral de 7 m x 7 m e 140 pontos. Na sequência, os pontos foram exportados para o aparelho receptor GPS, através do *software* GPS TrackMaker, conforme apresentado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Tela do *software* TrackMaker com as áreas e os pontos



Fonte: o autor

Em cada um dos pontos definidos, das três áreas do experimento, foi aberto um perfil no solo com ajuda de um enxadão e de uma pá reta, e coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas 0 - 0,15 m e 0,15 - 0,30 m. Tais profundidades foram definidas de acordo com o sistema radicular do milho pois, de acordo com Galvão et al. (2017), 75% das raízes encontram-se na camada superficial do solo (0 - 0,20 m).

A amostragem foi realizada de forma bem criteriosa, de modo que se evitasse a compactação do solo no interior do cilindro, através de uma leve escavação ao seu redor, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Processo de coleta de amostras indeformadas



Fonte: o autor

As amostras foram coletadas utilizando-se um trado tipo castelinho e anéis volumétricos de 50 cm³, conforme ilustrado na Figuras 11, e acondicionadas em cápsulas de alumínio, devidamente numeradas. Em seguida, foram lacradas com fita adesiva e encaminhadas ao laboratório.

Figura 11 – Trado tipo castelinho, cápsula de alumínio e anel volumétrico utilizados na coleta de amostras indeformadas



Fonte: o autor

a) UMIDADE DO SOLO

Para a medição da umidade do solo foi utilizado o método gravimétrico padrão, com base na massa de solo seco em estufa à temperatura a 105°C até atingir massa constante, conforme EMBRAPA (2017). É um método destrutivo, direto e muito preciso, onde o maior limitante é o tempo necessário para obtenção do resultado, o qual se aproxima de 24 horas.

Ao darem entrada no laboratório, conforme ilustrado na Figura 12, foram retiradas as fitas adesivas das cápsulas de alumínio e pesadas as amostras úmidas, juntamente com seus respectivos recipientes. Os conjuntos formados pela cápsula de alumínio e pelo anel volumétrico foram previamente pesados.

Figura 12 – Amostras de solo acondicionadas em cápsulas de alumínio



Fonte: o autor

Na sequência, as amostras foram transferidas para estufa a 105°C , permanecendo pelo tempo de 48 horas, de forma a atingir peso constante, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Amostras de solo transferidas para a estufa a 105°C



Fonte: o autor

Após esta etapa, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas no dessecador até que esfriassem, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Dessecador utilizado



Fonte: o autor

Em seguida, foram novamente pesadas juntamente com seus respectivos recipientes, utilizando-se uma balança de precisão (Figura 15).

Figura 15 – Balança de precisão utilizada



Fonte: o autor

A umidade em base gravimétrica foi determinada através da Equação 6:

$$CGA = \left(\frac{a-b}{b} \right) \quad (6)$$

Onde:

- CGA, umidade em base gravimétrica, em kg kg^{-1} ;
- a , massa da amostra úmida, em g;
- b , massa da amostra seca a 105°C até atingir peso constante, em g.

b) DENSIDADE DO SOLO

Para a determinação da densidade de solo foi utilizado o método do anel volumétrico, descrito pela EMBRAPA (2017), caracterizado pela obtenção da massa por pesagem e do volume pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada por meio de um cilindro de volume interno conhecido.

Inicialmente, com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 16), foram medidas e anotadas em triplicata as dimensões dos cilindros que foram utilizados para coleta das amostras indeformadas de solo. Com esses dados, foi possível a determinação do volume do cilindro.

Figura 16 – Paquímetro digital



Fonte: o autor

A massa da amostra foi obtida por meio de sua pesagem após secagem em estufa a 105°C, e o volume, por meio da medida do volume interno do cilindro metálico utilizado na coleta. A Figura 17, ilustra o solo coletado e contido no anel volumétrico.

Figura 17 – Amostra de solo coletada no anel volumétrico



Fonte: o autor

A densidade do solo foi determinada através da Equação 7:

$$D_S = \frac{m_a}{V} \quad (7)$$

Onde:

- D_S , densidade do solo, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3});
- m_a , massa da amostra de solo seco a 105°C até peso constante, em g;
- V , volume do cilindro, em cm^3 .

c) DENSIDADE DA PARTÍCULA

Para a determinação da densidade das partículas foi utilizado o método do balão volumétrico descrito pela EMBRAPA (2017), caracterizado pela obtenção da massa da amostra por pesagem e a determinação de seu volume.

Após a pesagem das amostras úmidas juntamente com seus respectivos recipientes, da transferência para estufa a 105°C permanecendo pelo tempo de 48 horas até que atingissem peso constante, e de sua retirada da estufa e encaminhamento para o dessecador, foram pesadas e, em seguida, destorroadas.

Na sequência, foram pesadas 20 g da amostra de solo e transferidas, com auxílio de um funil, para um balão volumétrico de 50 ml devidamente aferido com água desaerada. Em seguida, com apoio de uma bureta de 50 ml, foram adicionados ao balão volumétrico 20 ml de álcool etílico, o qual foi agitado de modo que se eliminassem as bolhas de ar que por ventura viessem a se formar (Figura 18).

Figura 18 – Bureta e balões volumétricos de 50 ml utilizados



Fonte: o autor

Após repouso de meia hora, de forma lenta e com o auxílio da bureta de 50 ml, foi-se adicionando álcool etílico ao balão volumétrico até que se completasse seu volume. Este volume de álcool etílico, então gasto para que o balão atingisse seu volume, foi anotado.

A densidade da partícula foi determinada através da Equação 8:

$$D_p = \frac{m_a}{(V_T - V_U)} \quad (8)$$

Onde:

- D_p , densidade da partícula, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3});
- m_a , massa da amostra de solo seco a 105°C até peso constante, em g;
- V_T , volume total aferido do balão, em ml;
- V_U , volume utilizado para completar o balão com a amostra, em ml.

d) POROSIDADE TOTAL

A porosidade total foi determinada pelo método indireto, descrito pela EMBRAPA (2017), estimada pela relação entre a densidade do solo e a densidade das partículas, sendo que a densidade do solo considera o volume de poros mais o volume das partículas e a densidade das partículas considera apenas o volume das partículas. Assim, é possível calcular o volume de poros assumindo a densidade de solo como resultado de uma média ponderada das densidades de partícula e do ar, desprezando-se a massa de ar.

A porosidade total determinada através da Equação 9:

$$P_t = \left[\frac{(D_p - D_s)}{D_p} \right] \quad (9)$$

Onde:

- P_t , porosidade total, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;
- D_p , densidade das partículas sólidas do solo, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3});
- D_s , densidade do solo, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3}).

e) TEXTURA

A textura expressa a distribuição percentual das partículas primárias e é determinada através da análise granulométrica. Para sua determinação, foi adotado o método da pipeta, descrito pela EMBRAPA (2017), que se caracteriza pela dispersão mecânica e estabilização da amostra por meio de agitador em uma solução dispersante adequada, seguida da separação das frações por peneiramento e sedimentação.

Inicialmente, foi pesada a quantidade de 10 g de cada amostra de solo, devidamente destorroada e peneirada, e transferida com auxílio de um funil, para uma garrafa. Em seguida, foi adicionado 50 ml de solução de hidróxido de sódio 1 mol l^{-1} às garrafas, que foram devidamente numeradas, tampadas e montadas no agitador tipo Wagner (Figura 19), sendo iniciada a agitação por 16 horas a 50 rpm. Decorrido o tempo, as garrafas foram retiradas do agitador e deu-se continuidade às demais etapas da análise.

Figura 19 – Agitador Tipo Wagner utilizado



Fonte: o autor

Iniciando o processo de separação de areia, foi montado um conjunto formado por uma peneira de malha 0,053 mm fixada sobre um funil apoiado numa proveta de 50 ml. Todo o material retido na garrafa, inclusive o material contido em sua tampa, foi transferido para a peneira e devidamente lavado com água deionizada, de forma que a quantidade de areia fosse separada e ficasse retida na peneira. A areia contida na peneira foi descartada, ficando apenas a mistura de argila com silte, depositadas na proveta.

Na sequência, com auxílio de um bastão com uma tampa de borracha contendo vários furos, a amostra contida na proveta (Figura 20) foi vigorosamente agitada por 1 minuto e, em seguida, inserida uma pipeta a 5 cm e coletado o líquido contendo e argila e silte, que foi imediatamente transferido para um béquer seco, limpo, previamente tarado e identificado.

Figura 20 – Provetas contendo a mistura de argila com silte



Fonte: o autor

Após o tempo de sedimentação da fração de silte, determinado em função da temperatura no momento do passo anterior, a pipeta foi inserida novamente a 5 cm de profundidade na proveta, onde foi coletado o líquido contendo a argila, que foi imediatamente transferido para outro béquer seco, limpo e previamente tarado e identificado.

Em seguida, os béqueres foram levados para secagem em estufa a 105°C por 24 horas e, posteriormente, com os resíduos dos pipetados já secos, foram transferidos para um dessecador até que esfriassem. Por fim, foram pesados em uma balança de precisão. As partículas foram classificadas de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: areia, de 2 a 0,05 mm; silte, de 0,05 a 0,002 mm; e argila, menor do que 0,002 mm (SANTOS et al., 2005).

f) RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

A resistência do solo a penetração foi avaliada com o auxílio de um penetrômetro de alta precisão e com medição de profundidade por tecnologia ultrassônica, da marca Falker, modelo PLG1020 (Figura 21).

Figura 21 – Penetrômetro Falker PLG1020 utilizado



Fonte: o autor

O equipamento é composto de um módulo eletrônico acoplado a uma haste dividida em duas partes, um cone na ponta inferior e uma base refletora. Possui peso de 3kg e, a altura total do equipamento com a haste, é de 104 cm.

Para a realização das medições a estrutura do medidor foi montada. O segmento de haste montável foi atarraxado na haste presa ao módulo eletrônico e, em seguida, o cone foi atarraxado na ponta da estrutura. Também, a base refletora foi colocada no chão no ponto onde se desejou fazer a medição.

Na sequência, foi medida a força necessária para que a haste penetrasse o solo nas profundidades 0 - 0,15 m e 0,15 - 0,30 m. A inserção da haste foi realizada com velocidade constante para garantir uma medição precisa. Em cada medição foi armazenado um valor de força medido para cada profundidade.

Os dados foram coletados simultaneamente à amostragem do solo para avaliação dos atributos físicos. Os valores de resistência do solo à penetração foram expressos em MPa.

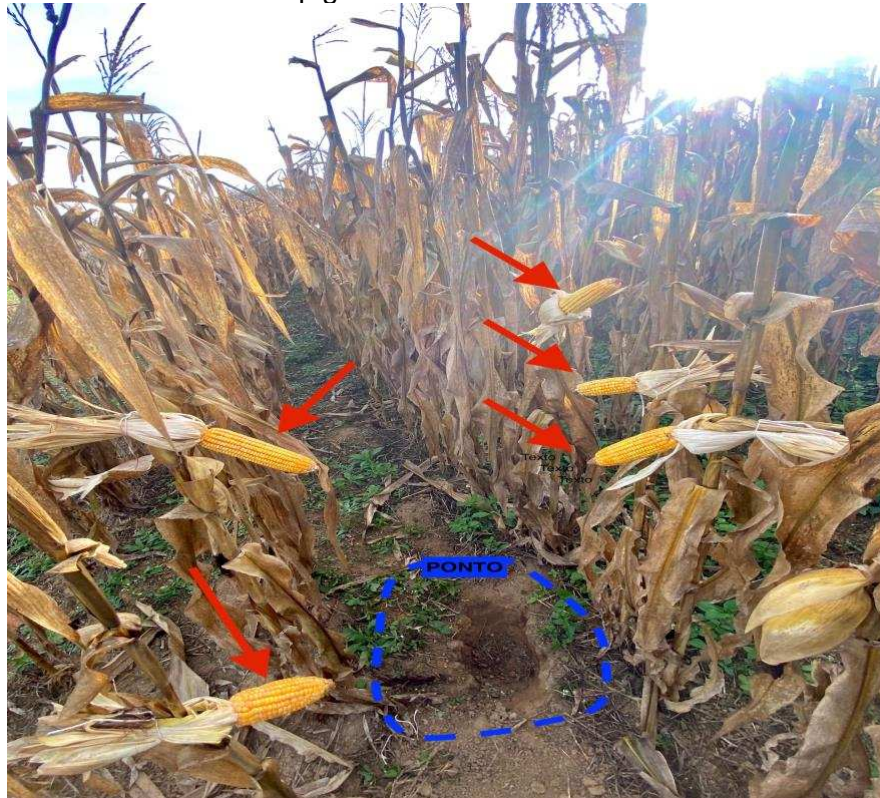
3.6 Componentes de rendimento dos grãos de milho

A partir do momento em que o grão do milho atingiu o estágio de maturação fisiológica, ou seja, no instante em que 50% das sementes da espiga apresentaram pequena mancha preta no ponto de inserção do sabugo (GALVÃO et al., 2017), o processo da colheita das amostras foi iniciado.

A colheita do milho na primeira área do experimento, que recebeu o sistema de cultivo mínimo, foi realizada em 20/05/2020, ou seja, 149 dias após o plantio; na segunda área, que recebeu o sistema de preparo convencional, a colheita foi realizada em 21/05/2020, 150 dias após o plantio; na terceira área, que recebeu o sistema de plantio direto, a colheita foi realizada em 22/05/2020, 151 dias após o plantio.

A colheita foi realizada manualmente nos arredores de cada um dos pontos onde foram coletadas as amostras para análise de solo, não excedendo a 1m de raio de distanciamento. Em cada ponto, foram coletadas 5 espigas de milho, que corresponderam à composição de cada amostra, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Ponto de coleta das espigas de milho



Fonte: o autor

Em seguida, as espigas correspondentes a cada uma das amostras coletadas foram acondicionadas em saco plástico devidamente identificado (Figura 23), lacradas e encaminhadas para uma sala onde se deu a continuidade do processo.

Figura 23 – Amostra coletada em cada ponto formada por cinco espigas de milho

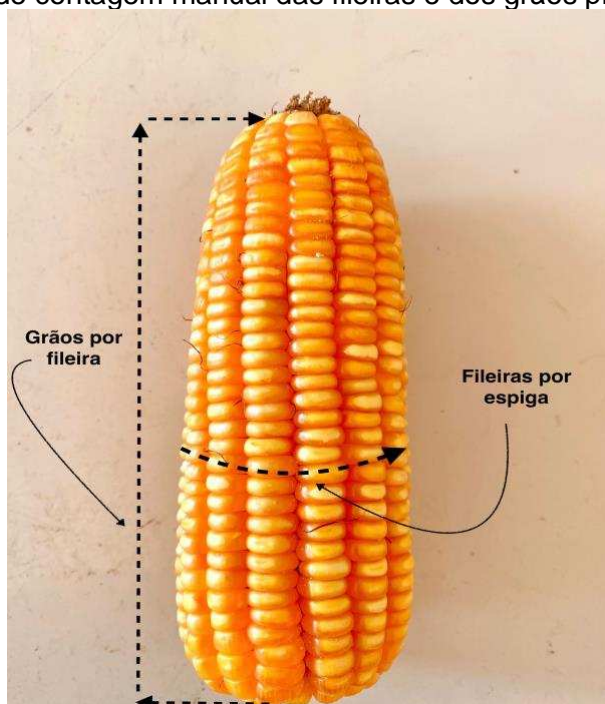


Fonte: o autor

Foram determinados os seguintes componentes de rendimento da cultura do milho: número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), número de grãos por espiga (NGE), peso de grãos por espiga (PGE) e peso de mil grãos da amostra (Pmil, g).

O número de fileiras por espiga (NFE) e o número de grãos por fileira (NGF) foram determinados através da contagem manual das fileiras presentes nas espigas e dos grãos presentes nas fileiras, respectivamente. Em seguida, foi encontrada a média dos cinco valores correspondentes para a composição do valor representante para cada amostra. O número de grãos por espiga (NGE) foi obtido pelo produto entre o número de fileiras das espigas (NFE) e o número de grãos presentes nas fileiras (NGF). A Figura 24, apresenta a forma como foi realizada a contagem manual das fileiras e dos grãos presentes nas fileiras.

Figura 24 – Processo de contagem manual das fileiras e dos grãos presentes nas fileiras



Fonte: o autor

O peso de grãos por espiga (PGE) foi determinado através da debulha e pesagem dos grãos presentes em cada espiga pertencente à amostra, seguindo para a determinação do seu valor médio para a composição do valor correspondente à amostra. O peso de mil grãos da amostra (Pmil, g) foi obtido de forma proporcional ao peso e ao número total dos grãos de cada amostra.

Para a determinação da umidade dos grãos, foram coletadas três amostras aleatórias dos grãos de cada uma das três áreas experimentais e colocadas em estufa a 105° C por 24 horas, seguindo-se a metodologia proposta por Brasil (2009). Os grãos foram pesados antes de serem acondicionadas na estufa e depois da sua retirada da estufa para determinação, de acordo com a Equação 10, do teor de água na amostra em base úmida.

$$U = \frac{P_i - P_f}{P_i} 100 \quad (10)$$

Onde:

- U , teor de água (% b.u.);
- P_i , massa inicial da amostra (g);
- P_f , massa final da amostra (g).

A umidade considerada para cada uma das três áreas experimentais, foi a média entre os três valores de umidade encontrados através da análise.

Visando a padronização nos resultados do peso de grãos por espiga (PGE), do peso de mil grãos (Pmil, g), e para que os grãos não fossem influenciados por diferentes teores de água, a umidade foi corrigida para 13% em base úmida, utilizando-se a Equação 11:

$$M_f = \left[1 - \left(\frac{U_i - U_f}{100 - U_i} \right) \right] M_i \quad (11)$$

Onde:

- M_f , massa dos grãos com 13% b.u. (g);
- U_i , teor de água inicial, b.u. (%);
- U_f , teor de água final, b.u. (%);
- M_i , massa das sementes inicial (g).

3.7 Análise de dados

A análise dos dados obtidos foi efetuada em duas etapas: primeiramente utilizando a estatística descritiva clássica, que assume que dados observados são independentes uns dos outros não considerando sua localização no terreno e, posteriormente, utilizando a análise geoestatística, utilizada para determinar qualquer dependência espacial existente.

3.7.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Os dados referentes a cada variável foram submetidos à análise estatística descritiva para determinação da média, mediana, valores máximos e mínimos, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), assimetria e curtose e distribuição de frequência dos dados, utilizando-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

A partir da análise descritiva, foi verificada a presença de dados discrepantes em determinadas variáveis pelo método de *Boxplot* (TUKEY, 1977). Foi tomada a decisão de substituí-los pela média de seus dois vizinhos mais próximos, segundo método de imputação de médias condicionadas sugerido por Mcknight et al. (2007).

Dentre as prováveis causas do aparecimento de tais valores discrepantes estão os possíveis erros amostrais em leituras, anotações e contagens, ou ainda, erros de laboratório. A presença destes valores influencia a parte inicial do variograma, além de exercer forte influência nos mapas, alterando desta forma, a dependência espacial, levando a interpretações equivocadas (BORSSOI et al., 2011). A hipótese de normalidade dos dados foi testada através do teste de Shapiro & Wilk (1965).

A variabilidade dos atributos físicos do solo e dos coeficientes de rendimento de grãos de milho foram classificados conforme Pimentel Gomes & Garcia (2002), sendo baixa para valor de CV menor que 10%; média, quando entre 10 e 20%; alta, quando entre 20 e 30%; e muito alta, se maior que 30%.

3.7.2 TESTE DE MÉDIAS

Inicialmente, foi realizada a análise de resíduo e verificadas as pressuposições de homogeneidade de variâncias, pelo teste de *Bartlett*, e a normalidade dos resíduos, através do teste de Shapiro & Wilk (1965). Como os dados foram obtidos de forma casualizada, foi assumida a pressuposição de independência.

Na sequência, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com os dados referentes aos componentes de rendimento de grãos do milho nos três sistemas de plantio. Posteriormente, as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as análises que compreenderam esta etapa foram realizadas utilizando-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

3.7.3 CORRELAÇÃO DE PEARSON

A análise de correlação de Pearson, com teste de significância para hipótese da nulidade ($H_0, \rho = 0$), foi utilizada para entender o grau de associação existente entre todos os atributos de solo avaliados e os coeficientes de rendimento de grãos de milho, nos três sistemas de plantio, utilizando-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

3.7.4 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A estatística descritiva é uma ferramenta importante para o conhecimento inicial da variabilidade dos atributos do solo, mas apenas ela, não é suficiente para o diagnóstico da localização espacial destes atributos (NOETZOLD et al., 2018). Dessa forma, se faz necessário utilizar a análise geoestatística para obter a variabilidade espacial de tais atributos.

Inicialmente para cada atributo, foi analisada a dependência espacial através da obtenção do semivariograma experimental. Para os ajustes, foi utilizado o método dos mínimos quadrados ponderados (AZEVEDO et al., 2012). Foram utilizados os modelos com patamar denominados isotrópicos: modelo esférico, exponencial e gaussiano (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Com objetivo de verificar a presença de anisotropia, os semivariogramas foram executados em todas as direções (YAMAMOTO & LANDIM, 2013).

O ajuste do modelo não é automático e foi realizado de forma totalmente interativa, fazendo um primeiro ajuste e verificando como o modelo teórico de ajustou. Dependendo do ajuste obtido, houve redefinição ou não do modelo, e tal procedimento foi sendo repetido até que se obtivesse um resultado considerado satisfatório. Os ajustes dos modelos de semivariograma foram efetuados pela seleção inicial do maior coeficiente de determinação (R^2). Carvalho et al. (2002) afirmaram que apesar da existência de métodos que verificam a qualidade do ajuste do modelo, ajustar modelos matemáticos aos semivariogramas é um procedimento subjetivo. Os semivariogramas foram revalidados pelo método da validação cruzada.

O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado pela Equação 12, conforme metodologia seguida por Cambardella et al. (1994):

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (12)$$

Onde:

- IDE , índice de dependência espacial;
- C_0 , efeito pepita;
- C_1 , contribuição.

Foi considerada dependência espacial forte, para valores menores ou iguais a 25%, moderada, para valores entre 25 e 75%, fraca, para IDE entre 75% e 100% e para valores iguais a 100% foi considerada efeito pepita puro.

O grau de aleatoriedade (E) presente nos dados em relação a sua regionalização, foi determinado segundo Guerra (1988). Quando $E < 0,15$, a componente aleatória é considerada pequena; $0,15 \leq E \leq 0,30$, significativa; e $E > 0,30$, muito significativa.

O alcance é um parâmetro importante na análise de semivariograma pois indica o limite da dependência espacial do atributo. Quanto maiores os valores encontrados para o alcance, maior a precisão na estimativa por krigagem (Machado et al., 2007). Para a interpolação dos atributos que apresentaram dependência espacial foi usada a krigagem ordinária, adotando os modelos teóricos estabelecidos.

Com objetivo de correlacionar espacialmente os coeficientes de rendimento de grãos de milho com os atributos físicos do solo avaliados, foram estimados os semivariogramas cruzados. O peso de grãos por espiga foi considerado a variável principal e os atributos físicos do solo como as covariáveis, sendo que, de tais atributos foram utilizados apenas aqueles que apresentaram dependência espacial (VIEIRA, 2000). Ainda de acordo com o autor, o valor do alcance nos semivariogramas cruzados indica até que distância as variáveis estão correlacionadas espacialmente. Os ajustes dos modelos de semivariograma cruzados foram efetuados pela seleção inicial do maior coeficiente de determinação (R^2). Os semivariogramas foram revalidados pelo método da validação cruzada.

A análise geoestatística, bem como a elaboração dos mapas de atributos obtidos por interpolação via krigagem utilizando os modelos ajustados aos semivariograma, foram realizadas através do *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019) com apoio das bibliotecas *ggplot2* (WICKHAM, 2016) e *gstat* (GRÄLER et al., 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva

Serão apresentadas na sequência, as análises estatísticas descritivas referentes à caracterização química e textural da área experimental, às propriedades físicas do solo estudadas e aos componentes de rendimento de grãos de milho, bem como a discussão acerca de seus resultados.

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas descritivas dos atributos químicos do solo avaliados nas três subáreas do experimento. Os valores médios de cada atributo foram interpretados com base na recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação (ALVAREZ et al., 1999). A variabilidade de cada atributo foi classificada de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação (CV), de acordo com Pimentel Gomes & Garcia (2002).

Para a primeira subárea que recebeu o sistema de cultivo mínimo, a acidez ativa (pH) com valor médio 5,38 obteve classificação média, não sendo necessária sua correção. O fósforo (P) com 16,70 e o fósforo remanescente (P-rem) com 21,98, obtiveram boa classificação; o potássio (K) com 53,54, obteve classificação média e, o cálcio trocável (Ca^{+2}) com 0,67 e o magnésio trocável (Mg^{+2}) com 0,14, obtiveram classificação baixa. No que se refere à variabilidade dos atributos, observa-se baixa para o pH, com CV 7,0%; média para o P-rem com CV 11,07%; e muito alta para o P, K, Ca^{+2} e Mg^{+2} , com CV 91,20%, 44,57%, 47,78% e 44,07% respectivamente.

Já para segunda subárea que recebeu o sistema de preparo convencional, o pH com valor médio 5,86 obteve classificação média, não sendo necessária sua correção. O P com 20,39 e o P-rem com 27,83, obtiveram boa classificação. O K com 34,84, o Ca^{+2} com 1,890 e o Mg^{+2} com 0,51, obtiveram classificação média. No que se refere à variabilidade dos atributos, observa-se baixa para o pH e P-rem, com CV 5,51% e 8,08%; alta variabilidade para Ca^{+2} com CV 26,77%; e variabilidade muito alta para P, K, Mg^{+2} , com CV 57,82%, 45,53% e 30,86%, respectivamente.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos atributos químicos do solo avaliados nas três subáreas do experimento

Atributo Químico	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
ÁREA 1									
pH (H ₂ O)	4,37	6,33	5,38	5,38	0,38	7,00	-0,02	-0,11	0,70 (N)
P (mg. dm ⁻³)	2,05	71,88	16,70	10,69	15,23	91,20	1,45	1,41	0,00 (N-N)
K (mg. dm ⁻³)	16,80	123,40	53,54	46,25	23,86	44,57	1,08	0,62	0,00 (N-N)
Ca ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,11	1,48	0,67	0,61	0,32	47,78	0,66	-0,25	0,00 (N-N)
Mg ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,03	0,36	0,14	0,14	0,06	44,07	0,56	0,04	0,00 (N-N)
Al ⁺³ (cmolc.dm ⁻³)	0,00	0,70	0,29	0,30	0,17	58,17	0,33	-0,63	0,00 (N-N)
(H + Al) (cmolc.dm ⁻³)	2,36	7,21	4,73	4,72	0,96	20,41	0,01	-0,45	0,82 (N)
SB (cmolc.dm ⁻³)	0,25	2,10	0,98	0,90	0,41	42,28	0,60	-0,22	0,00 (N-N)
P-rem (mg. dm ⁻³)	16,32	27,40	21,98	21,52	2,43	11,07	0,29	-0,27	0,00 (N-N)
(t) (cmolc.dm ⁻³)	0,81	1,94	1,26	1,20	0,27	21,67	0,64	-0,32	0,00 (N-N)
(T) (cmolc.dm ⁻³)	3,68	7,70	5,71	5,67	0,77	13,55	-0,01	-0,16	0,97 (N)
V (%)	3,67	37,01	17,36	15,92	7,80	44,94	0,59	-0,36	0,00 (N-N)
m (%)	0,00	75,97	25,89	23,03	17,56	67,83	0,60	-0,33	0,00 (N-N)
ÁREA 2									
pH (H ₂ O)	5,00	6,75	5,86	5,88	0,32	5,51	-0,16	0,06	0,69 (N)
P (mg. dm ⁻³)	3,95	57,76	20,39	17,64	11,79	57,82	0,99	0,25	0,00 (N-N)
K (mg. dm ⁻³)	12,10	79,30	34,84	30,23	15,86	45,53	1,05	0,33	0,00 (N-N)
Ca ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,61	3,25	1,89	1,88	0,50	26,77	0,28	-0,02	0,25 (N)
Mg ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,23	0,89	0,51	0,52	0,16	30,86	0,44	-0,33	0,00 (N-N)
Al ⁺³ (cmolc.dm ⁻³)	0,00	0,34	0,08	0,05	0,09	109,54	1,28	0,85	0,00 (N-N)
(H + Al) (cmolc.dm ⁻³)	2,20	6,72	3,94	3,84	0,94	23,77	0,40	-0,43	0,00 (N-N)
SB (cmolc.dm ⁻³)	1,00	4,17	2,50	2,53	0,62	25,0	0,17	-0,34	0,67 (N)
P-rem (mg. dm ⁻³)	22,15	32,60	27,83	28,32	2,24	8,08	0,28	-0,50	0,00 (N-N)
(t) (cmolc.dm ⁻³)	1,46	3,92	2,57	2,56	0,53	20,44	0,64	0,30	0,07 (N)
(T) (cmolc.dm ⁻³)	4,78	8,45	6,45	6,37	0,75	11,70	0,41	-0,31	0,01 (N-N)
V (%)	15,56	66,73	39,27	39,43	10,41	26,52	0,13	-0,47	0,30 (N)
m (%)	0,00	14,59	3,20	1,90	3,63	113,28	1,37	1,17	0,00 (N-N)
ÁREA 3									
pH (H ₂ O)	4,72	6,17	5,48	5,50	0,30	5,42	-0,21	-0,23	0,48 (N)
P (mg. dm ⁻³)	2,51	37,41	11,95	8,70	8,07	67,54	1,20	0,71	0,00 (N-N)
K (mg. dm ⁻³)	21,10	127,80	62,04	59,60	23,99	38,66	0,50	-0,21	0,00 (N-N)
Ca ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,25	1,88	1,05	1,02	0,35	33,29	0,15	-0,42	0,39 (N)
Mg ⁺² (cmolc.dm ⁻³)	0,08	0,54	0,26	0,26	0,09	33,98	0,34	-0,25	0,12 (N)
Al ⁺³ (cmolc.dm ⁻³)	0,00	0,65	0,27	0,25	0,15	61,70	0,40	-0,57	0,00 (N-N)
(H + Al) (cmolc.dm ⁻³)	2,72	6,72	4,60	4,50	0,82	17,97	0,15	-0,14	0,44 (N)
SB (cmolc.dm ⁻³)	0,40	2,59	1,47	1,45	0,43	29,62	0,04	-0,35	0,90 (N)
P-rem (mg. dm ⁻³)	21,52	30,32	26,54	26,54	1,98	7,53	-0,23	-0,47	0,01 (N-N)
(t) (cmolc.dm ⁻³)	0,91	2,60	1,73	1,71	0,32	18,76	0,23	-0,24	0,26 (N)
(T) (cmolc.dm ⁻³)	4,64	7,36	6,01	6,0	0,57	9,46	0,02	-0,50	0,77 (N)
V (%)	6,12	44,41	24,11	23,30	7,33	30,41	0,26	-0,01	0,31 (N)
m (%)	0,00	43,59	15,30	13,57	10,44	68,25	0,56	-0,45	0,00 (N-N)

CV = coeficiente de variação (%); pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo disponível; K = potássio disponível; Ca⁺² = cálcio trocável; Mg⁺² = magnésio trocável; Al⁺³ = acidez trocável; H + Al = acidez potencial; SB = soma de bases; P-rem = fósforo remanescente; (t) = capacidade de troca de cátions efetiva; (T) = capacidade de troca de cátions em pH; V = saturação de bases; m = saturação por Al⁺³; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal.

E na terceira subárea que recebeu o sistema plantio direto, o pH com valor médio 5,48 obteve classificação média, não sendo necessária sua correção. O P com 11,95 e o P-rem com 26,54, obtiveram boa classificação; o K com 62,04 obteve

classificação média; o Ca^{+2} com 1,05, obteve classificação baixa; e o Mg^{+2} com 0,26, obteve classificação muito baixa. No que se refere à variabilidade dos atributos, observa-se baixa para o pH e P-rem, com CV 5,42% e 7,53%, nesta ordem; e variabilidade muito alta para Ca^{+2} com CV 26,77%; e variabilidade muito alta para P, K, Ca^{+2} e Mg^{+2} , com CV 67,54%, 38,66%, 33,29% e 33,98%, nesta ordem.

Observam-se que as classificações em relação aos valores médios dos atributos químicos foram muito semelhantes entre as três subáreas do experimento. Mesma situação foi encontrada em trabalho conduzido por Cavalcante et al (2007), em estudos sobre a variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. Tal fato pode ser justificado pela proximidade entre as três áreas utilizadas e pelo mesmo sistema de fertilização empregado em plantios anteriores.

Nas três subáreas do estudo, observa-se que o pH obteve baixa variabilidade e nos atributos P, K, Ca^{+2} , Mg^{+2} , foram encontradas altas ou muito altas variabilidades. Schlindwein & Anghinoni (2000), em estudo sobre amostragem do solo no sistema plantio direto, encontraram alta variabilidade para as variáveis P e K e baixas para o pH em água e matéria orgânica do solo.

Para as altas ou muito altas variabilidades encontradas nos atributos P, K, Ca^{+2} , Mg^{+2} , o motivo pode estar associado aos efeitos dos resíduos de fertilizações anteriores, pois a adubação é realizada na linha de plantio e a correção da acidez do solo é realizada a lanço, desta forma, não ocorrem aplicações homogêneas na área. Silva et al. (2003) afirmaram que, mesmo as aplicações a lanço seguidas de revolvimento do solo, acarretam em variabilidade no solo. Motomiya et al. (2011), em estudo acerca da variabilidade espacial dos atributos do solo em área de cultivo de algodoeiro no Cerrado brasileiro, também observaram tal situação.

De forma geral, ainda que registrada a ocorrência de distribuições não-normais, observa-se que os valores da média e da mediana de todos os atributos químicos estão próximos, salientando a ideia de que os dados não apresentaram assimetria acentuada. Little & Hills (1978) relataram que quando os valores da média, mediana e moda são próximos, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal.

Segundo Cambardella et al. (1994), tal ocorrência pode indicar que tais medidas de posição não foram influenciadas por valores excepcionais, comprovando que todos os atributos avaliados se aproximam de uma distribuição normal. Outro fator que comprova tal ideia, é o fato dos coeficientes de assimetria, variando de - 0,23 a 1,37 e curtose, variando de - 0,47 a 1,41, apresentarem valores próximos de zero.

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL

Na sequência, é apresentada a Tabela 5 com as estatísticas descritivas dos atributos granulométricos avaliados nos três sistemas de plantio. O tipo de solo referente a cada área, com sua referida classe textural, foi classificado de acordo com seus valores médios, segundo Embrapa (2018). A variabilidade de cada atributo granulométrico, foi classificada de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação (CV), de acordo com Pimentel Gomes & Garcia (2002).

Com relação ao cultivo mínimo, os teores médios para os atributos granulométricos foram 53,05, 41,02 e 5,93, para a areia, a argila e o silte, nesta ordem. Isto classifica o solo referente a esta área como tipo 3 – argiloso de classe textural argilo-arenosa. Observa-se que as frações granulométricas areia e argila, apresentaram baixa variabilidade, com coeficientes de variação 5,90% e 7,54%, respectivamente. Já o silte, apresentou alta variabilidade, com coeficiente de variação 28,20%.

Já em relação ao sistema preparo convencional, as médias para os atributos foram 59,05, 32,10 e 8,80, para a areia, a argila e o silte, respectivamente. Isto classifica o solo referente a esta área como tipo 2 – textura média de classe textural franco-argilo-arenosa. A areia apresentou coeficiente de variação 6,08% expressando baixa variabilidade. Já a argila e o silte, com coeficientes de variação 10,50% e 19,92% apresentaram média variabilidade.

Com relação ao sistema de plantio direto, as médias para os atributos foram 60,45, 34,35 e 5,14, para a areia, a argila e o silte, respectivamente. Isto classifica o solo referente a esta área como tipo 2 – textura média de classe textural argilo-arenosa. A areia apresentou coeficiente de variação 5,19% expressando baixa variabilidade, a argila obteve 10,95% apresentando média variabilidade e, o silte, alcançou 27,17% expressando alta variabilidade.

De uma forma geral, observa-se que as quantidades de areia, argila e silte encontram-se muito próximas entre os três sistemas de plantio. Os mesmos resultados também foram observados por Neto et al. (2017) ao avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma sub-bacia às margens do rio Mogi Guaçu (SP). Tal fato pode ser justificado pela proximidade entre as três áreas utilizadas e, também, pelo fato da textura ser uma propriedade física estável, não se modificando

significativamente ao longo do tempo ou através da utilização de práticas agrícolas diversas, mesmo em camadas superficiais (MONIZ et al., 1975).

Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos atributos granulométricos do solo avaliados nos três sistemas de plantio

Atributo Físico (%)	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
CULTIVO MÍNIMO									
Areia	53,05	53,00	46,00	60,84	3,13	5,90	0,06	- 0,61	0,06 (N)
Argila	41,02	41,00	33,00	48,00	3,09	7,54	- 0,13	- 0,40	0,15 (N)
Silte	5,93	6,00	2,00	10,00	1,68	28,20	0,13	- 0,42	0,01 (N-N)
PREPARO CONVENCIONAL									
Areia	59,10	59,00	51,00	67,00	3,60	6,08	0,14	- 0,80	0,12 (N)
Argila	32,10	32,00	24,00	40,00	3,37	10,50	- 0,10	- 0,57	0,21 (N)
Silte	8,80	9,00	5,00	13,00	1,75	19,92	0,05	- 0,32	0,01 (N-N)
PLANTIO DIRETO									
Areia	60,45	60,46	52,32	67,00	3,13	5,19	- 0,178	- 0,434	0,21 (N)
Argila	34,35	34,12	23,84	45,00	3,76	10,95	0,16	0,13	0,25 (N)
Silte	5,20	5,31	1,82	8,00	1,44	27,17	0,23	- 0,50	0,01 (N-N)

CV= Coeficiente de variação; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal; P<W= resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

O silte apresentou a maior variabilidade encontrada entre os atributos granulométricos, fato que pode estar relacionado a grande mobilidade destas partículas no solo (SANTOS et al., 2010).

Observa-se que os valores entre a média e a mediana para cada atributo foram muito próximos. Apesar da ocorrência de distribuição não-normal para o silte nas três subáreas, os coeficientes de assimetria e curtose com valores 0,13 e - 0,42 para o cultivo mínimo, 0,05 e - 0,32 para o preparo convencional e 0,23 e - 0,50 para o plantio direto, nesta ordem, variaram próximos de zero, indicando uma tendência à normalidade. A areia e a argila apresentaram normalidade. Situação parecida que foi observada por Sanchez et al. (2009), que teve por objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar.

4.1.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Serão apresentados na sequência, os resultados das análises das propriedades físicas do solo, em cada sistema de plantio adotado. A variabilidade, foi classificada de acordo com critério estabelecido por Pimentel Gomes & Garcia (2002).

a) CULTIVO MÍNIMO

De acordo com a Tabela 6, as médias encontradas para a DS foram 1,62 e 1,60 kg dm⁻³, na primeira e segunda camada respectivamente. Como o solo foi caracterizado como argiloso de classe textural argilo-arenosa segundo Embrapa (2018), a DS em ambas as camadas se enquadrou fora dos valores médios estabelecidos para este atributo, onde a amplitude varia de 1,30 a 1,40 kg dm⁻³ (REICHERT et al., 2003). Silva et al. (2005) observaram variação de 1,46 a 1,64 kg dm⁻³ ao avaliar, em um preparo reduzido, os atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho.

A DP apresentou médias 2,60 e 2,63 kg dm⁻³ na primeira e segunda camada, nesta ordem, estando na amplitude de 2,30 a 2,90 kg dm⁻³ recomendada por Camargo & Alleoni (1997).

A PT assumiu os valores médios 0,38 e 0,40 m³ m⁻³ na primeira e segunda camada, na devida ordem. Segundo Fiori & Carmignani (2001), a PT foi classificada como média em ambas as camadas. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalho conduzido por Lima et al. (2006), acerca da compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo.

A RSP teve como valores médios para a primeira e segunda camada, 1,79 e 1,77 MPa, respectivamente, que de acordo com a classificação estabelecida por Canarache (1990), se enquadraram como baixas e com pouca limitação ($1,1 \leq RSP < 2,5$ MPa). Souza & Alves (2008) em estudos a respeito das propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos, encontraram valores com mesma classificação para a RSP no sistema de cultivo mínimo.

Observa-se que a umidade gravimétrica (UG), a densidade do solo (DS), a densidade da partícula (DP) e a porosidade total (PT), nas duas camadas de solo, apresentaram CV entre 2,78% e 9,25%, caracterizando assim, baixa variabilidade nos

atributos. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2015) em trabalho sobre a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no sistema cultivo mínimo

Atributo Físico	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
RSP1 (MPa)	1,79	1,75	0,81	3,08	0,51	28,62	0,26	- 0,58	0,07 (N)
RSP2 (MPa)	1,77	1,72	0,63	3,06	0,46	26,02	0,19	- 0,17	0,46 (N)
UG1 (m ³ m ⁻³)	0,19	0,19	0,16	0,24	0,02	8,62	0,22	- 0,43	0,24 (N)
UG2 (m ³ m ⁻³)	0,19	0,19	0,15	0,22	0,01	8,04	- 0,02	- 0,44	0,53 (N)
DS1 (kg dm ⁻³)	1,62	1,62	1,47	1,77	0,07	4,07	0,04	- 0,48	0,42 (N)
DS2 (kg dm ⁻³)	1,60	1,59	1,39	1,77	0,08	4,98	0,06	- 0,39	0,40 (N)
DP1 (kg.dm ⁻³)	2,60	2,61	2,43	2,79	0,07	2,78	-0,05	- 0,64	0,28 (N)
DP2 (kg.dm ⁻³)	2,63	2,63	2,45	2,78	0,07	2,85	- 0,17	- 0,70	0,10 (N)
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,38	0,38	0,30	0,45	0,03	7,84	- 0,02	- 0,51	0,88 (N)
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,40	0,39	0,30	0,50	0,04	9,25	- 0,27	- 0,38	0,23 (N)

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; CV= Coeficiente de variação; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal; P<W= resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

A resistência do solo à penetração obteve coeficientes de variação 28,62% e 26,02%, na primeira e segunda camada respectivamente, indicando média variabilidade, valores semelhantes aos encontrados por Oliveira et al. (2017), em estudos para avaliar a correlação espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho com os componentes de produção do tomate industrial.

b) PREPARO CONVENCIONAL

Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no preparo convencional

Atributo Físico	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
RSP1 (MPa)	2,05	1,88	0,34	4,60	0,97	47,16	0,51	- 0,50	0,01 (N-N)
RSP2 (MPa)	1,71	1,80	0,26	3,24	0,62	35,93	- 0,11	- 0,13	0,44 (N)
UG1 (m ³ m ⁻³)	0,19	0,19	0,13	0,25	0,02	12,52	0,15	- 0,16	0,17 (N)
UG2 (m ³ m ⁻³)	0,18	0,18	0,14	0,22	0,02	10,56	- 0,21	- 0,75	0,05 (N)
DS1 (kg dm ⁻³)	1,62	1,63	1,35	1,80	0,10	5,72	- 0,48	- 0,18	0,05 (N)
DS2 (kg dm ⁻³)	1,67	1,68	1,50	1,87	0,077	4,207	0,017	- 0,36	0,99 (N)
DP1 (kg.dm ⁻³)	2,60	2,60	2,49	2,73	0,06	2,13	0,17	- 0,65	0,10 (N)
DP2 (kg.dm ⁻³)	2,63	2,63	2,50	2,79	0,06	2,13	- 0,02	- 0,42	0,79 (N)
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,38	0,38	0,30	0,47	0 0,04	9,73	0,22	- 0,33	0,36 (N)
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,37	0,37	0,28	0,44	0,03	8,50	- 0,02	- 0,30	0,92 (N)

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; CV= Coeficiente de variação; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal; P<W= resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

De acordo com a Tabela 7, em relação à DS, as médias encontradas foram 1,62 e 1,67 kg dm⁻³, na primeira e segunda camada respectivamente. Como o solo apresenta textura média de classe textural franco-argilo-arenosa segundo Embrapa (2018), a DS se enquadrou fora dos valores médios estabelecidos para este atributo (REICHERT et al., 2003). Mazurana et al. (2011) estudando os efeitos de diversos sistemas de preparo nas propriedades físicas do solo encontraram valores semelhantes para o sistema convencional.

A densidade da partícula apresentou médias 2,60 e 2,63 kg dm⁻³ na primeira e segunda camada, nesta ordem, estando na amplitude de 2,30 a 2,90 kg dm⁻³

recomendada por Camargo & Alleoni (1997).

A porosidade total assumiu os valores médios 0,38 e 0,37 m³ m⁻³ na primeira e segunda camadas, na devida ordem. Segundo Fiori & Carmignani (2001), a PT foi classificada como média em ambas as camadas. Valores semelhantes foram encontrados por Tormena et al. (2002), para o sistema de preparo convencional.

Com relação à RSP, os valores médios 2,05 e 1,72 MPa foram obtidos para a primeira e a segunda camada, nesta ordem, que de acordo com a classificação estabelecida por Canarache (1990), ambas foram classificadas como baixas e com pouca limitação ($1,1 \leq RSP < 2,5$ MPa). Resultados semelhantes foram obtidos por Gabriel Filho et al. (2000), em trabalho sobre preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde.

A densidade do solo (DS), a densidade da partícula (DP) e a porosidade total (PT), nas duas camadas de solo, apresentaram CV entre 2,13% e 9,73%, caracterizando assim, baixa variabilidade.

Já a umidade gravimétrica (UG), apresentou CV 12,52% e 10,56%, na primeira e segunda camada respectivamente, caracterizando desta forma, média variabilidade. Valores semelhantes foram encontrados por Cavalcante et al. (2011) em estudos sobre um Latossolo Vermelho do cerrado do Mato Grosso em um sistema de preparo convencional.

A resistência do solo à penetração obteve CV 47,16% e 35,93%, na primeira e segunda camada respectivamente, indicando alta variabilidade. Mesmas classificações de RSP foram encontradas por Cavalcante et al. (2011).

c) PLANTIO DIRETO

De acordo com a Tabela 8, no que se refere à DS, as médias encontradas foram 1,65 e 1,63 kg dm⁻³, na primeira e segunda camada respectivamente. Como o solo foi caracterizado como sendo de textura média de classe textural argilo-arenosa segundo Embrapa (2018), a DS se enquadrou fora dos valores médios estabelecidos para este atributo (REICHERT et al., 2003). Neto et al. (2017) encontraram valores com amplitude de 1,41 a 1,8 kg dm⁻³, com média 1,60 kg dm⁻³.

A densidade da partícula apresentou médias 2,61 e 2,63 kg dm⁻³ na primeira e segunda camada, nesta ordem, estando na amplitude de 2,30 a 2,90 kg dm⁻³ recomendada por Camargo & Alleoni (1997).

Tabela 8 – Estatísticas descritivas dos atributos físicos do solo no plantio direto

Atributo Físico	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
RSP1 (MPa)	2,77	2,72	0,48	4,93	0,86	30,86	- 0,14	0,03	0,75 (N)
RSP2 (MPa)	1,96	2,0	0,20	4,37	0,86	43,78	- 0,027	- 0,41	0,13 (N)
UG1 (m ³ m ⁻³)	0,14	0,14	0,11	0,18	0,02	12,52	0,15	- 1,06	0,01 (N-N)
UG2 (m ³ m ⁻³)	0,15	0,14	0,12	0,19	0,02	10,49	0,27	- 0,81	0,05 (N)
DS1 (kg dm ⁻³)	1,65	1,66	1,48	1,82	0,07	4,41	- 0,17	- 0,32	0,32 (N)
DS2 (kg dm ⁻³)	1,63	1,63	1,45	1,80	0,07	4,09	- 0,08	- 0,04	0,93 (N)
DP1 (kg.dm ⁻³)	2,61	2,60	2,48	2,72	0,05	2,00	- 0,12	- 0,52	0,67 (N)
DP2 (kg.dm ⁻³)	2,63	2,64	0,30	2,77	0,06	2,24	- 0,20	- 0,51	0,21 (N)
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,37	0,37	0,30	0,42	0,03	6,92	0,03	- 0,24	0,75 (N)
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,38	0,38	0,28	0,46	0,03	7,63	- 0,08	- 0,12	0,68 (N)

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; CV= Coeficiente de variação; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal; P<W= resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

A porosidade total assumiu os valores médios 0,37 e 0,39 m³ m⁻³ na primeira e segunda camadas, na devida ordem. Segundo Fiori & Carmignani (2001), a PT foi classificada como média em ambas as camadas. Schaffrath et al. (2008), em estudo sobre a variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional, encontraram valores médios para a porosidade total de 0,3278, 0,412, 0,5768 kg m⁻³ nas faixas de profundidade 0 - 0,10 m 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m.

Sobre a RSP, os valores médios 2,77 e 1,96 MPa foram obtidos para a primeira e a segunda camada, nesta ordem. De acordo com a classificação estabelecida por Canarache (1990), a RSP1 foi classificada como média e com alguma limitação (2,6 ≤ RSP < 5,0 MPa), e a RSP2 como baixa e com pouca limitação (1,1 ≤ RSP < 2,5

MPa). Resultados semelhantes foram obtidos por Tavares Filho et al. (2001), verificando maiores valores de RSP em camada até 0,15 m.

Com relação à variabilidade dos atributos, observa-se que os atributos DS, DP e PT, nas duas camadas de solo, apresentaram CV entre 2,00% e 7,63%, caracterizando assim, baixa variabilidade. Já a UG, apresentou CV 12,52% e 10,49%, na primeira e segunda camada respectivamente, caracterizando desta forma, média variabilidade. Dessa forma, corroboraram com resultados obtidos por Cavalcante et al. (2011) e Altikat et al. (2011), os quais variaram entre de 3% a 15%.

A resistência do solo à penetração obteve coeficientes de variação 30,86% e 43,78%, na primeira e segunda camada respectivamente, indicando alta variabilidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Freddi et al. (2006) e Cavalcante et al. (2011).

d) ASPECTOS GERAIS OBSERVADOS

A RSP apresentou maiores valores médios na primeira camada nos três sistemas de plantio estudado, indicando uma compactação maior nas camadas iniciais do solo. Segundo Carvalho et al. (2011), os sistemas de plantio têm provocado a compactação superficial do solo, que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento deste. Em consequência, há aumento da resistência mecânica do solo e da disponibilidade de água, reduzindo, o desenvolvimento radicular e o crescimento das culturas (SILVA et al., 2003).

Foi observada maior densidade na camada superficial do solo em comparação com a subsuperfície, nos sistemas CM e PD, sendo o contrário constatado no PC. Tal fato pode estar influenciado pela intensidade de revolvimento do solo, concordando com trabalho de Tormena et al. (2002)

A maior densidade do solo nas primeiras camadas avaliadas dos três sistemas de plantio de solo, foi encontrada no PD. Fato que pode ser explicado em decorrência do efeito das pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas, modificando o arranjo das partículas do solo antes da instalação do experimento (SILVA et al., 2005). Já a menor densidade foi encontrada no CM. A longo prazo, é possível que o acúmulo de matéria orgânica e a redução no tráfego contribuam para reduzir a densidade do solo no sistema de cultivo mínimo (LEITE et al., 2009).

Foi observado aumento da PT em relação à profundidade, nos sistemas CM e PD. O contrário foi observado no PC. Stone & Silveira (2001) concluíram que o não-revolvimento do solo ocasiona maior compactação da camada superficial do solo, evidenciada pelo maior valor de densidade e menores de porosidade total, enquanto que o revolvimento superficial do solo propiciou o menor valor de densidade e o maior de porosidade.

Observa-se que os resultados apresentados para cada atributo, em cada sistema de plantio adotado, são semelhantes entre si, nas diferentes camadas avaliadas. Resultados similares foram obtidos por Rodrigues et al. (2012). Segundo os autores, tal ocorrência se associa ao fato de que a análise por meio da estatística clássica não seja suficiente para verificar a variabilidade dos atributos físicos do solo.

Os atributos estudados apresentaram-se normalmente distribuídos nas duas camadas avaliadas, com exceção da RSP1 no preparo convencional e para a UG1 no plantio direto. Apesar destas duas ocorrências, percebe-se que os valores da média e da mediana, 2,05 e 1,88 MPa nesta ordem, para a RSP1, e idênticos 0,14 m³ m⁻³ para a UG1, são muito próximos ou idênticos; e que os coeficientes de assimetria e curtose, com valores 0,51 e - 0,50 respectivamente, para a RSP1, e 0,15 e - 1,16 para a UG1, variaram próximos de zero, apontando a ideia de que os dados não apresentaram assimetria acentuada. Desta forma, tem-se uma tendência à normalidade.

4.1.4 COMPONENTES DE RENDIMENTO DOS GRÃOS DE MILHO

Na Tabela 9 a seguir, são apresentadas as estatísticas descritivas dos componentes de rendimento dos grãos da cultura do milho, em cada sistema de plantio adotado. A variabilidade, também foi classificada de acordo do critério estabelecido por Segundo Pimentel Gomes & Garcia (2002).

Os valores médios com seus relativos componentes de rendimento encontrados para o cultivo mínimo foram: 14,98 fileiras por espiga, 32,35 grãos por fileira, 484,6 grãos por espiga, peso de 109,10 g por espiga e peso de 225,8 g para mil grãos.

Observa-se que o NFE, o NGF e o NGE, apresentaram CV entre 5,11% e 8,44%, indicando baixa variabilidade. Já o PGE e o Pmil, com CV 13,83% e 10,79% nesta ordem, apresentaram média variabilidade.

Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos componentes de rendimento dos grãos da cultura do milho dos três sistemas de plantio

CR	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)	Coeficientes		Distribuição P < W
							Assimetria	Curtose	
CULTIVO MÍNIMO									
NFE	14,98	14,80	13,20	16,80	0,77	5,11	- 0,07	- 0,52	0,02 (N-N)
NGF	32,35	32,60	26,40	37,40	2,23	6,91	- 0,31	- 0,41	0,15 (N)
NGE	484,6	484,0	386,4	595,2	40,90	8,44	0,01	- 0,35	0,67 (N)
PGE	109,10	110,85	73,21	144,95	15,08	13,83	- 0,12	- 0,36	0,60 (N)
Pmil	225,8	225,5	160,1	291,1	24,28	10,76	0,04	- 0,29	0,85 (N)
PREPARO CONVENCIONAL									
NFE	15,12	15,20	14,00	16,40	0,58	3,85	- 0,04	- 0,56	0,01 (N-N)
NGF	32,53	32,50	26,60	37,80	2,12	6,53	- 0,02	- 0,19	0,79 (N)
NGE	492,8	494,0	407,6	593,2	38,64	7,84	0,04	- 0,25	0,54 (N)
PGE	128,82	129,30	83,48	168,70	16,20	12,57	0,06	0,01	0,71 (N)
Pmil	259,8	261,5	191,1	322,8	26,48	10,20	- 0,03	- 0,27	0,75 (N)
PLANTIO DIRETO									
NFE	14,79	14,80	13,60	16,40	0,69	4,61	0,21	-0,65	0,01 (N-N)
NGF	29,76	29,90	23,00	35,8	2,91	9,78	- 0,11	- 0,65	0,24 (N)
NGE	439,6	438,8	321,6	560,8	49,80	11,33	0,05	- 0,51	0,88 (N)
PGE	105,46	108,10	43,59	161,16	25,05	23,76	- 0,02	- 0,50	0,52 (N)
Pmil	237,8	235,7	144,8	330,5	39,64	16,67	- 0,10	- 0,38	0,63 (N)

CR = coeficientes de rendimento; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos; CV= Coeficiente de variação; N = Distribuição normal; N-N = Distribuição não-normal; P<W= resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

Os atributos estudados apresentaram-se normalmente distribuídos, com exceção do NFE. Apesar desta ocorrência de não-normalidade com relação ao NFE, percebe-se que os valores para a média e a mediana são muito próximos, ou seja, 14,98 e 14,80 respectivamente; e os coeficientes de assimetria e de curtose apresentaram valores - 0,07 e - 0,52 nesta ordem, variando muito próximos de zero. Tais características indicam uma tendência à normalidade.

Já em relação ao preparo convencional, os valores médios com seus relativos componentes de rendimento, encontrados para o cultivo mínimo foram: 15,12 fileiras por espiga, 32,53 grãos por fileira, 492,8 grãos por espiga, peso de 128,82 g por espiga e peso de 259,8 g para mil grãos.

O NFE, o NGF e o NGE, apresentaram CV entre 3,85% e 7,84%, indicando

baixa variabilidade. Já o PGE e o Pmil, com coeficientes de variação 12,57% e 10,20% nesta ordem, apresentaram média variabilidade.

Os atributos estudados apresentaram-se normalmente distribuídos, com exceção do NFE. Apesar desta ocorrência de não-normalidade com relação ao NFE, percebe-se que os valores para a média e para a mediana são muito próximos, ou seja, 15,12 e 15,20 respectivamente; e os coeficientes de assimetria e de curtose apresentaram valores - 0,04 e - 0,56 nesta ordem, variando muito próximos de zero. Tais características indicam uma tendência à normalidade.

Sobre o plantio direto, os valores médios com seus relativos componentes de rendimento encontrados para o cultivo mínimo foram: 14,79 fileiras por espiga, 29,76 grãos por fileira, 439,6 grãos por espiga, peso de 105,46 g por espiga e peso de 237,8 g para mil grãos.

Observa-se que o NFE e o NGF, apresentaram CV 4,61% e 9,78% nesta ordem, indicando baixa variabilidade. Já o NGE e o Pmil, com CV 11,33% e 16,67% respectivamente, apresentaram média variabilidade. O PGE apresentou coeficiente de variação 23,76%, indicando alta variabilidade.

Os atributos estudados apresentaram-se normalmente distribuídos, com exceção do NFE. Apesar desta ocorrência de não-normalidade com relação ao NFE, percebe-se que os valores para a média e para a mediana são muito próximos, ou seja, 14,79 e 14,80 respectivamente; e os coeficientes de assimetria e de curtose apresentaram valores 0,21 e - 0,65 nesta ordem, variando muito próximos de zero. Tais características indicam uma tendência à normalidade.

Observando a Tabela 9, verifica-se que o PC apresentou maiores valores médios para todos os componentes de rendimento de grãos de milho entre os três sistemas de plantio analisados. Silva et al. (2018) obtiveram resultados semelhantes ao avaliarem a cultura do milho sob diferentes sistemas de manejo de solo.

Carvalho et al. (2004), avaliando a produtividade de milho sobre diferentes preparos do solo e plantas de cobertura, observou que nos primeiros anos do experimento, houve diferenças significativas entre os sistemas de preparo do solo, sendo que para o PC ocorreram maiores rendimentos de milho.

a) COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DOS GRÃOS DA CULTURA DO MILHO NOS TRÊS SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO

A seguir, é apresentada a Tabela 10 contendo a comparação das médias dos componentes de rendimento dos grãos de milho nos três sistemas de preparo do solo.

Tabela 10 – Comparação das médias dos componentes de rendimento dos grãos de milho nos três sistemas de preparo do solo

Coeficiente de rendimento	Valores médios dos sistema de plantio		
	Cultivo mínimo	Preparo convencional	Plantio direto
NFE	14,98 AB	15,12 A	14,79 B
NGF	32,35 A	32,53 A	29,76 B
NGE	484,6 A	492,8 A	439,6 B
PGE	109,10 B	128,82 A	105,46 B
Pmil	225,8 C	259,8 A	237,8 B

NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos. Letras maiúsculas na mesma linha comparam os diferentes sistemas de plantio dentro de coeficiente de rendimento. Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma linha, não se diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se com relação ao número de fileiras por espiga (NFE), que houve igualdade quando comparados o cultivo mínimo e o preparo convencional e, o cultivo mínimo e o plantio direto. Foi detectada diferença entre o preparo convencional e o plantio direto.

Já o número de grãos por fileira (NGF), apresentou médias maiores e iguais entre o cultivo mínimo e o preparo convencional, em comparação ao plantio direto. A mesma situação foi observada no número de grãos por espiga (NGE). O peso de grãos por espiga (PGE), apresentou no preparo convencional a maior média, seguido do cultivo mínimo e do plantio direto, que apresentaram médias iguais.

Com relação ao peso de mil grãos (Pmil), houve diferença entre os três sistemas de preparo, sendo que o preparo convencional apresentou maior valor médio, seguido do plantio direto e do cultivo mínimo, respectivamente. Resultado semelhante ao encontrado por Silva et al. (2018).

4.2 Análise de correlação

A seguir é apresentada a análise de correlação entre os atributos físicos do solo e os componentes de rendimento de grãos de milho nos três sistemas de preparo de solo.

4.2.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA CULTIVO MÍNIMO

Tabela 11 – Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o sistema de cultivo mínimo

	RSP1	RSP2	UG1	UG2	DS1	DS2	DP1	DP2	PT1	PT2	NFE	NGF	NGE	PGE	Pmil
RSP1	1														
RSP2	0,20*	1													
UG1	-0,14*	0,11	1												
UG2	-0,20*	-0,10	0,48**	1											
DS1	0,08	-0,14	-0,31	-0,36	1										
DS2	-0,02	-0,06	-0,24	-0,45**	0,32	1									
DP1	-0,05	-0,13	-0,06	0,02	0,09	0,03	1								
DP2	0,06	-0,04	0,09	-0,02	0,00	-0,15	0,20	1							
PT1	-0,09	0,05	0,26	0,35	-0,79**	-0,25	0,48**	0,10	1						
PT2	0,02	0,03	0,27	0,39	-0,28	-0,87**	0,09	0,56**	0,27	1					
NFE	0,11	0,03	0,09	-0,03	-0,03	0,12	-0,02	-0,13	0,00	-0,16	1				
NGF	-0,18*	-0,02	0,16	0,28	0,00	-0,12	0,07	-0,02	0,05	0,11	-0,08	1			
NGE	-0,06	0,02	0,17	0,23	-0,03	-0,03	0,07	-0,10	0,06	0,01	0,54**	0,78**	1		
PGE	-0,13	-0,02	0,20	0,14	-0,12	-0,07	-0,11	0,01	0,06	0,08	0,27	0,56**	0,63**	1	
Pmil	-0,05	0,01	0,15	-0,01	-0,06	-0,06	-0,23	0,01	-0,06	0,05	0,01	0,16	0,13	0,77**	1

Significativo a 5% - *, significativo a 1% - **, RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos.

De acordo com a Tabela 11, com referência à correlação atributos físicos do solo versus atributos físicos do solo, observa-se correlação com significância positiva entre os pares: UG1 e UG2 (0,48**), DP1 e PT1 (0,48**), DP2 e PT2 (0,56**). Foram observadas correlação com significância negativa entre os pares: RSP1 e UG1(-0,14), RSP1 e UG2 (-0,20*), UG2 e DS2 (-0,45**), DS1 e PT1 (-0,79**), DS2 e PT2 (-0,87**).

Já a correlação entre os coeficientes de rendimento de grãos de milho versus os coeficientes de rendimento de grãos de milho, apresenta correlação com

significância positiva entre os pares: NFE e NGE (0,54**), NGF e NGE (0,78**), NGF e PGE (0,56**), NGE e PGE (0,63**) e PGE e Pmil (0,77**). Não foram observadas correlações com significância negativa.

Analisando a correlação atributos físicos do solo versus coeficientes de rendimento de grãos de milho, observou-se apenas uma correlação e com significância negativa no par RSP1 e NGF (-0,18*).

4.2.2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA PREPARO CONVENCIONAL

Tabela 12 – Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o sistema preparo convencional

	RSP1	RSP2	UG1	UG2	DS1	DS2	DP1	DP2	PT1	PT2	NFE	NGF	NGE	PGE	Pmil
RSP1	1														
RSP2	-0,05	1													
UG1	-0,13	0,00	1												
UG2	-0,30**	0,08	0,58**	1											
DS1	-0,07	0,11	-0,41	-0,14	1										
DS2	0,03	0,03	-0,10	-0,33	0,06	1									
DP1	-0,07	-0,09	-0,11	-0,12	0,05	0,06	1								
DP2	-0,08	0,00	0,01	0,00	-0,11	-0,01	0,18*	1							
PT1	0,04	-0,10	0,33	0,07	-0,92**	-0,05	0,29**	0,20	1						
PT2	-0,02	-0,10	0,10	0,23	-0,10	-0,81**	-0,01	0,41**	0,14	1					
NFE	-0,03	-0,09	-0,05	-0,05	0,07	0,05	-0,06	0,10	-0,08	0,04	1				
NGF	0,10	-0,04	-0,10	-0,08	0,02	-0,18	0,07	0,06	0,01	0,24	0,03	1			
NGE	0,02	-0,06	-0,14	-0,07	0,09	-0,11	0,05	0,12	-0,04	0,22	0,48**	0,81**	1		
PGE	-0,03	0,07	-0,06	0,00	0,04	-0,09	-0,03	0,17	-0,04	0,17	0,16	0,39	0,48**	1	
Pmil	-0,09	0,11	0,06	0,05	-0,06	-0,01	-0,04	0,11	0,05	0,02	-0,15	-0,12	-0,14	0,73**	1

Significativo a 5% - *, significativo a 1% - **, RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos.

Segundo a Tabela 12, com referência à correlação atributos físicos do solo versus atributos físicos do solo, observa-se correlação com significância positiva entre os pares: UG1 e UG2 (0,58**), DP1 e DP2 (0,18*) e DP1 e PT1 (0,29**). Foram observadas correlação com significância negativa entre os pares: RSP1 e UG2 (-0,30**), DS1 e PT1 (-0,92**), DS2 e PT2 (-0,81**).

Já a correlação entre os coeficientes de rendimento de grãos de milho versus os coeficientes de rendimento de grãos de milho, apresenta correlação com significância positiva entre os pares: NFE e NGE (0,48**), NGF e NGE (0,81**), NGE e PGE (0,48**) e PGE e Pmil (0,73**). Não foram observadas correlações com significância negativa.

Analisando a correlação atributos físicos do solo versus coeficientes de rendimento de grãos de milho, não se observou correlação com significância.

4.2.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO MENSURADOS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

Tabela 13 – Matriz de correlação entre os atributos físicos do solo e os coeficientes de rendimento de grãos de milho mensurados sob o plantio direto

	RSP1	RSP2	UG1	UG2	DS1	DS2	DP1	DP2	PT1	PT2	NFE	NGF	NGE	PGE	Pmil
RSP1	1														
RSP2	0,05	1													
UG1	-0,12	0,09	1												
UG2	-0,09	0,15	0,84**	1											
DS1	0,16	0,07	-0,14	-0,02	1										
DS2	0,22	-0,02	-0,09	-0,17*	0,37**	1									
DP1	0,06	0,02	0,10	0,15	0,12	0,05	1								
DP2	-0,09	-0,01	0,05	0,10	0,04	-0,02	0,29**	1							
PT1	-0,19*	-0,05	0,16**	0,11	-0,82**	-0,39**	0,23**	0,08	1						
PT2	-0,24**	0,01	0,11	0,20**	-0,29	-0,87**	0,10	0,49**	0,36**	1					
NFE	-0,10	-0,02	-0,06	0,02	-0,07	-0,15	-0,12	0,05	0,09	0,16	1				
NGF	-0,14	-0,08	0,18*	0,14	-0,09	-0,16	-0,02	0,09	0,03	0,17	0,17	1			
NGE	-0,16*	-0,10	0,11	0,11	-0,11	-0,19	-0,06	0,09	0,06	0,20	0,54**	0,91**	1		
PGE	-0,16	-0,11	0,23**	0,19*	-0,11	-0,27	-0,05	0,06	0,05	0,25	0,29	0,78**	0,79**	1	
Pmil	-0,13	-0,08	0,24**	0,19*	-0,10	-0,25	-0,04	0,01	0,03	0,22	0,04	0,50**	0,45*	0,90**	1

Significativo a 5% - *, significativo a 1% - **, RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos.

De acordo com a Tabela 13, com referência à correlação atributos físicos do solo versus atributos físicos do solo, observa-se correlação com significância positiva entre os pares: UG1 e UG2 (0,84**), UG1 e PT1 (0,16**), DS1 e DS2 (0,37**), UG2 e PT2 (0,20**), DP1 e DP2 (0,29**), DP1 e PT1 (0,23**), DP2 e PT2 (0,49**) e PT1 e

PT2 (0,36**). Foram observadas correlação com significância negativa entre os pares: RSP1 e PT1 (-0,19*), RSP1 e PT2 (-0,24**), UG2 e DS2 (-0,17*), DS1 e PT1 (-0,82**), DS2 e PT1 (-0,39**), DS2 e PT2 (-0,87**).

Já a correlação entre os coeficientes de rendimento de grãos de milho versus os coeficientes de rendimento de grãos de milho, apresenta correlação com significância positiva entre os pares: NFE e NGE (0,54**), NGF e NGE (0,91***), NGF e PGE (0,78**), NGF e Pmil (0,50**), NGE e PGE (0,79*), NGE e Pmil (0,45*) e PGE e Pmil (0,90**). Não foram observadas correlações com significância negativa.

Analisando a correlação atributos físicos do solo versus coeficientes de rendimento de grãos de milho, observou-se correlação com significância positiva nos pares: UG1 e NGF (0,18*), UG1 e PGE (0,23**), UG1 e Pmil (0,24**), UG2 e PGE (0,19*) e UG2 e Pmil (0,19*). Não foram observadas correlações com significância negativa.

4.2.4 ASPECTOS GERAIS OBSERVADOS

Nos três sistemas de plantio, observa forte correlação negativa entre os pares DS1/PT1 e DS2/PT2, indicando que em ambas camadas, a medida que a densidade do solo aumenta a porosidade total diminui significativamente. Tais correlações eram esperadas, uma vez que a porosidade total foi determinada pelo método indireto, e a compressão do solo reduz o tamanho dos poros e aumenta a densidade do solo. Reichert et al. (2009b), justificaram que a densidade e a porosidade são atributos associados às alterações no volume de solo, sendo relacionados com a compactação do solo, apresentando relação inversa uma com a outra. Argenton et al. (2005) e Cunha et al. (2011) também encontraram correlação negativa da DS com a PT.

Observa-se, também, nos três sistemas de plantio, correlação positiva significativa entre os pares DP1/PT1 e DP2/PT2, indicando que a densidade das partículas aumenta à medida que a porosidade total também aumenta, em ambas camadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Cruz et al. (2010), onde os autores salientaram que áreas de maior DP correspondem a áreas de maior PT.

Com relação às correlações negativas encontradas entre a RSP e UG, sugere-se que com o aumento da RSP há diminuição da UG. O mesmo pode ser notado nos pares onde houve correlação negativa entre a DS e a UG, indicando que, com o aumento da DS há diminuição da UG. Tais resultados foram semelhantes aos

encontrados por Montanari et al. (2013), indicando que solos compactados tendem a ter menor quantidade de água. O PGE e o Pmil estiveram correlacionados positivamente em todos os sistemas de cultivo.

De uma forma geral, foi observado um número maior de correlações significativas no sistema de plantio direto em relação aos sistemas preparo convencional e cultivo mínimo.

4.3 Análise geoestatística

A análise geoestatística foi realizada em três etapas. A primeira compreendeu a avaliação da dependência espacial através do ajuste dos semivariogramas empíricos de cada atributo. Já a segunda, para aqueles atributos que apresentaram dependência espacial, foi feita a interpolação por krigagem. E a terceira, cujo objetivo foi correlacionar espacialmente o peso de grãos de grãos por espiga e os atributos físicos do solo, foram estimados os semivariogramas cruzados.

O índice de dependência espacial (IDE) foi classificado segundo Cambardella et al. (1994) e o grau de aleatoriedade segundo Guerra (1988).

4.3.1 CULTIVO MÍNIMO

a) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA DE CULTIVO MÍNIMO

A seguir é apresentada a Tabela 14, com o resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema cultivo mínimo.

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que apenas a DP2 com alcance 3,83 m, apresentou distância menor que o raio de busca utilizado para as amostras desta área, de 7,8 m, sendo possível inferir que não houve dependência espacial para este atributo nas condições analisadas, caracterizando efeito pepita puro. Carvalho et al. (2011), ao estudarem o efeito de diferentes sistemas de preparos do solo na

produção da cana-de-açúcar, também encontraram efeito pepita puro para a densidade das partículas. Desta forma, pode-se considerar a malha utilizada nesta área de cultivo mínimo (7,8 x 7,8 m) como adequada, pois conseguiu captar a dependência espacial em 14 dos 15 casos analisados.

Em relação ao IDE, houve predominância de dependência espacial moderada, através dos atributos: RSP1, UG1, UG2, DS1, DS2, PT1, PT2 e Pmil. Ressalta-se que, quanto maior o valor do IDE, mais o semivariograma explica a variância dos dados. A componente de aleatoriedade foi considerada significativa para a DP1 e muito significativa para todos os demais atributos, indicando que as variáveis não contêm reconhecíveis padrões ou regularidades (GUERRA, 1988).

Com relação aos modelos teóricos utilizados para modelar a dependência espacial, houve predominância do modelo gaussiano, através dos atributos: RSP1, UG1, UG2, DS1, DS2, DP1, PT1, PT2, NGF e NGE.

Tabela 14 – Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma simples para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema cultivo mínimo

Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
RSP1	Gaussiano	0,200	0,309	34,958	17%	Moderada	M.S.
RSP2	Linear	0,190	0,211	23,205	1,48%	Fraca	M.S.
UG1	Gaussiano	0,00017	0,00029	16,427	21,35%	Moderada	M.S.
UG2	Gaussiano	0,0001	0,00028	37,71	38,59%	Moderada	M.S.
DS1	Gaussiano	0,0035	0,00496	31,78	13,65%	Moderada	M.S.
DS2	Gaussiano	0,0039	0,0079	43,71	32,41%	Moderada	M.S.
DP1	Gaussiano	0,0051	0,0064	70,52	3,68%	Fraca	M.S.
DP2	EPP	0,00162	0,0057	3,83	0,41%	EPP	EPP
PT1	Gaussiano	0,0008	0,0011	39,89	9,67%	Moderada	M.S.
PT2	Gaussiano	0,0009	0,001645	50,98	26,81%	Moderada	M.S.
Componentes de rendimento de grãos de milho							
NFE	Esférico	0,4819	0,6139	52,27	5,02%	Fraca	M.S.
NGF	Gaussiano	3,905	4,862	19,84	13,34%	Fraca	M.S.
NGE	Gaussiano	1511,946	1841,836	51,09	4,91%	Fraca	M.S.
PGE	Esférico	192,427	236,0627	72,81	6,78%	Fraca	M.S.
Pmil	Exponencial	317,525	601,522	8,03	5,45%	Moderada	M.S.

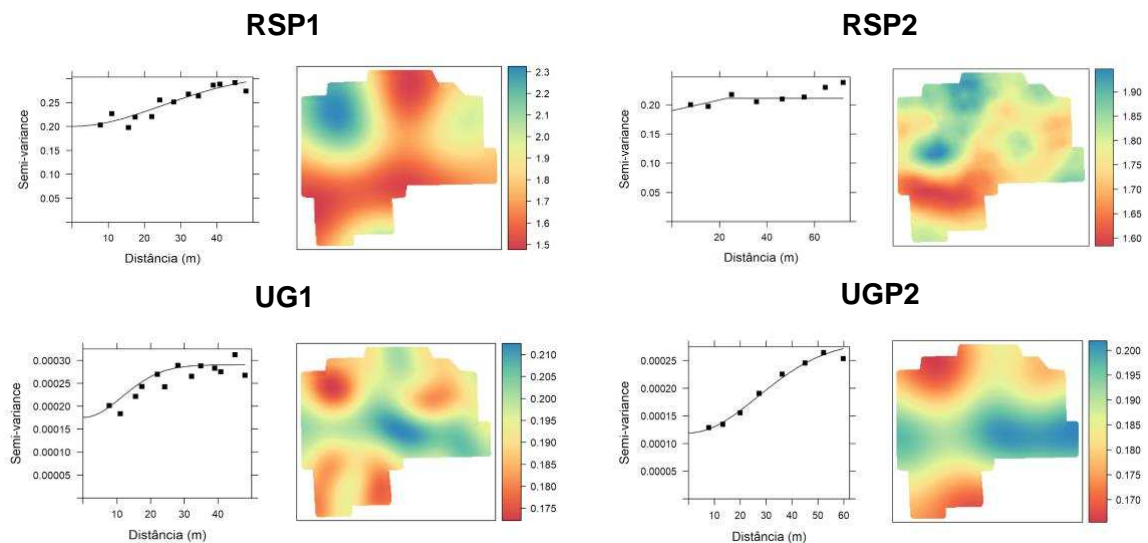
RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos; R^2 = coeficiente de determinação do modelo de semivariograma; IDE = índice de dependência espacial; EPP = Efeito pepita puro; E = grau de aleatoriedade; Peq. = pequena; Sig. = significativa; M.S. = muito significativa.

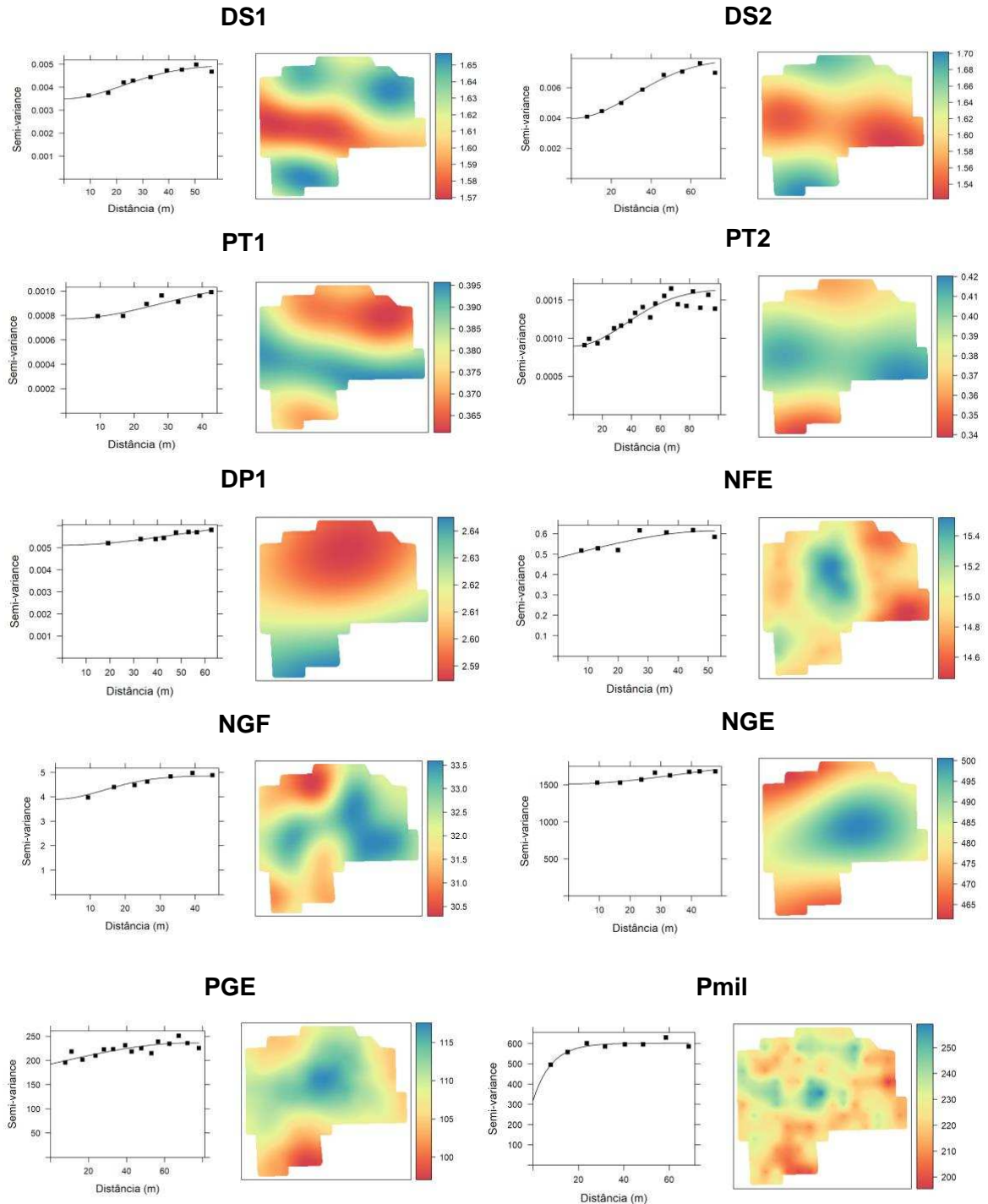
O alcance é um parâmetro de suma importância na análise de semivariograma pois indica o limite da dependência espacial do atributo (VIEIRA, 2000). A RSP apresentou alcances de 34,958 e 23,205 m, para a primeira e segunda camada, nesta ordem. A DS apresentou 31,78 e 43,71 m, para a primeira e segunda camada, respectivamente. Em estudos sobre variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade, Johann et al. (2004) encontraram valores muito próximos para os atributos em questão. Já a PGE apresentou alcance de 72,81 m.

A seguir é apresentada a Figura 25 com os semivariogramas teóricos ajustados das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho, e seus mapas de krigagem apresentando a sua distribuição espacial no sistema de cultivo mínimo.

Observa-se através dos mapas que a DP e a PT tiveram comportamentos bastante semelhantes. Na análise de correlação linear tal fato já havia sido constatado, observando-se correlação com significância positiva entre os pares DP1/PT1 e DP2/PT2. Em locais com maiores valores de RSP, a UG é menor, em ambas as camadas. O mesmo foi observado para a DS e a PT. O inverso também é verificado, e tais fatos já eram esperados pois foram percebidas correlações com significância negativa entre os atributos. Constata-se, ainda, semelhanças nas duas profundidades para os atributos RSP, UG, DS e PT.

Figura 25 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus mapas de krigagem no sistema de cultivo mínimo





RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos

Os atributos físicos do solo apresentaram manchas em mesmos locais para menores valores de DS e maiores valores de UG e PT, em ambas camadas de profundidade. É possível estabelecer uma relação direta com a PGE, que apresentou valores mais altos de produção nestes locais. Desta forma, fica evidenciado que a

PGE foi mais elevada em nas áreas que apresentaram menor compactação do solo.

b) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE CULTIVO MÍNIMO

A Tabela 15 a seguir, apresenta o resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de cultivo mínimo.

Para todos os pares formados nos semivariogramas cruzados foi detectada dependência espacial forte, assim como em trabalho conduzido por Montanari et al. (2013). Houve maior predominância de ajuste pelo modelo exponencial, para os atributos: RSP1, UG1, DS1, DS2, DP1, PT1 e PT2. Apenas os atributos RSP2 e UG2 foram ajustados pelo modelo gaussiano.

Tabela 15 – Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de cultivo mínimo

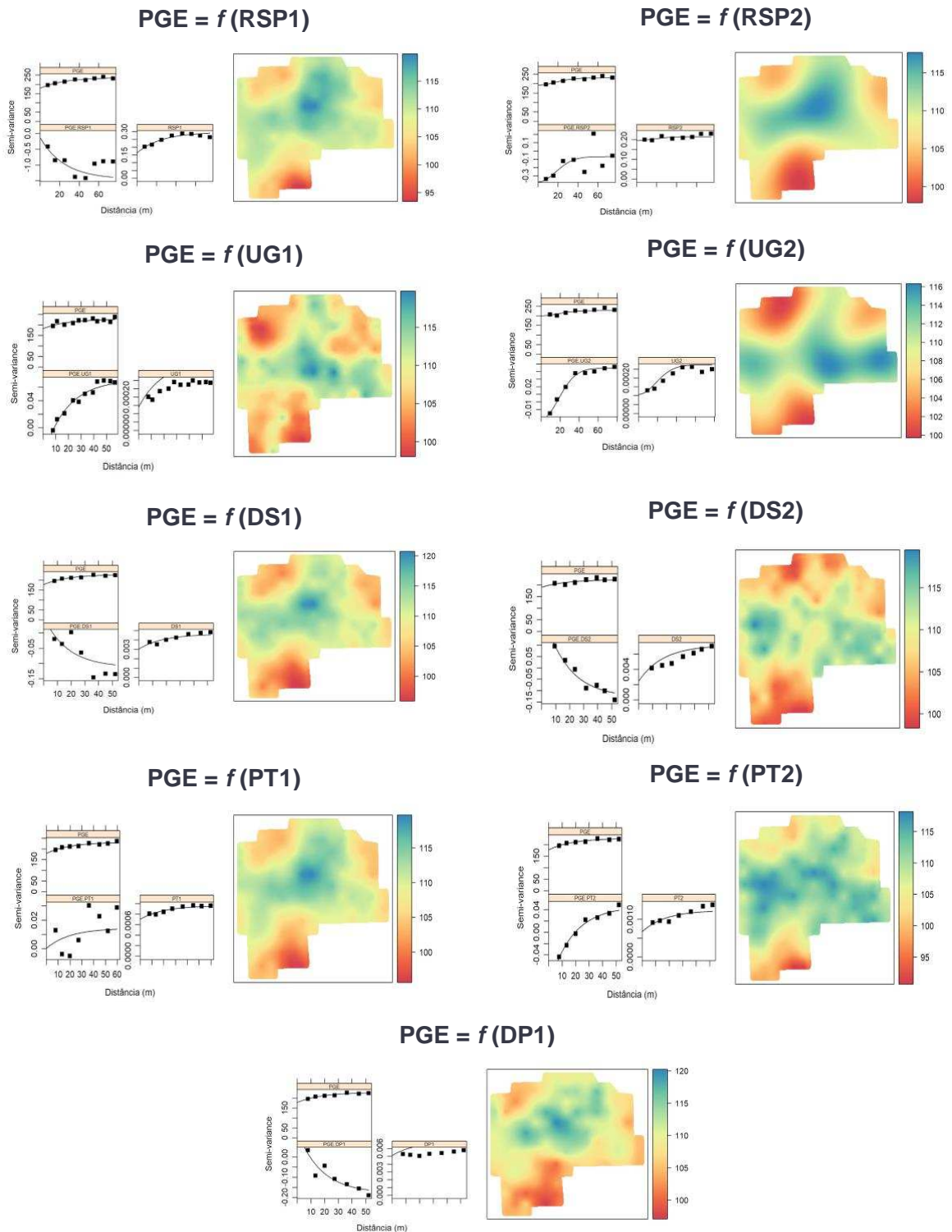
Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
PGE = $f(RSP1)$	Exponencial	- 0,129	- 1,4504	24,87	7,95%	Forte	Peq.
PGE = $f(RSP2)$	Gaussiano	- 0,371	- 0,06820	24,87	6,28%	Fraca	Peq.
PGE = $f(UG1)$	Exponencial	- 0,042	0,071014	18,87	7,68%	Forte	Peq.
PGE = $f(UG2)$	Gaussiano	- 0,023	0,04453	25,84	7,44%	Forte	Peq.
PGE = $f(DS1)$	Exponencial	0,0526	- 0,1128	17,39	6,66%	Forte	Peq.
PGE = $f(DS2)$	Exponencial	0,2629	- 0,12949	17,39	5,73%	Forte	Peq.
PGE = $f(DP1)$	Exponencial	0,128	- 0,1787	17,39	8,00%	Forte	Peq.
PGE = $f(PT1)$	Exponencial	0,0003	0,014357	19,94	6,18%	Forte	Peq.
PGE = $f(PT2)$	Exponencial	0,0970	0,24017	17,39	7,78%	Forte	Peq.

RSP_i = resistência do solo à penetração; UG_i = umidade gravimétrica; DS_i = densidade do solo; DP_i = densidade de partícula; PT_i = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; R^2 = coeficiente de determinação do modelo de semivariograma; IDE = índice de dependência espacial; E = grau de aleatoriedade, M.S. = muito significativa, Peq. = pequena.

O valor do alcance nos semivariogramas cruzados indica até que distância as variáveis estão correlacionadas espacialmente (VIEIRA, 2000). Dessa forma, foram encontrados valores para o alcance indo de 17,39 m para os atributos DS1, DS1, DP1 e PT2, até 24,87 m para a RSP1 e a RSP2.

A seguir é apresentada a Figura 26 com os semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo e seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de cultivo mínimo.

Figura 26 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de cultivo mínimo



RSP_i = resistência do solo à penetração; UG_i = umidade gravimétrica; DS_i = densidade do solo; DP_i = densidade de partícula; PT_i = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga

A análise visual dos mapas de isolinhas vai ao encontro dos resultados dos semivariogramas cruzados dos atributos analisados, confirmando a existência de correlação espacial entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo em questão.

Foram encontradas correlações espaciais positivas entre a PGE e os atributos: UG1, UG2, PT1 e PT2; e negativas entre a PGE e os atributos: RSP1, RSP2, DS1, DS2 e DP1. Tais fatos corroboram com a ideia de que compactação do solo tem influência negativa na PGE.

4.3.2 PREPARO CONVENCIONAL

a) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA PREPARO CONVENCIONAL

A seguir é apresentada a Tabela 16, com o resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de preparo convencional.

Os atributos DS2, PT1 e NGF com alcances 2,17, 4,87 e 3,10 m respectivamente, apresentaram distâncias menores que o raio de busca utilizado para as amostras desta área, de 6,2 m, caracterizando efeito pepita puro. Tal ocorrência sugere que as amostras para estudo de tais atributos no sistema de preparo convencional, devem ser feitas a distâncias menores que as utilizadas na amostragem desta área. Assim, pode-se considerar que a malha utilizada foi adequada, pois conseguiu captar a dependência espacial em 12 dos 15 casos analisados.

Martins et al. (2009) verificando a correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e os atributos físicos do solo, encontraram efeito pepita para a densidade do solo e a porosidade total. DS1. A ausência de dependência espacial do atributo DS2 pode estar associada à ação dos discos de arado e da grade no preparo convencional, que ocasionou compactação do solo na camada subsuperficial, conhecida como pé-de-grade.

Tabela 16 – Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma simples para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de preparo convencional

Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
RSP1	Gaussiano	0,8128	1,030344	17,22	7,09%	Fraca	Sig.
RSP2	Gaussiano	0,2461	0,4053	7,36	9,95%	Moderada	Sig.
UG1	Esférico	0,0003	0,00065	24,95	21,29%	Moderada	M.S.
UG2	Esférico	0,00019	0,100041	24,22	19,81%	Moderada	M.S.
DS1	Gaussiano	0,00771	0,01069	77,74	2,50%	Moderada	M.S.
DS2	EPP	0	0,005159	2,17	0,10%	EPP	EPP
DP1	Esférico	0,00217	0,00319	7,39	12,01%	Moderada	M.S.
DP2	Esférico	0,0003	0,00324	8,75	0,22%	Forte	Peq.
PT1	EPP	0,0012	0,00127	4,87	10,41%	EPP	EPP
PT2	Exponencial	0,0009	0,0010	10,43	0,53%	Fraca	M.S.
Componentes de rendimento de grãos de milho							
NFE	Esférico	0,2667	0,328	19,38	4,02%	Fraca	M.S.
NGF	EPP	2,534	4,491	3,10	1,17%	EPP	EPP
NGE	Gaussiano	1383,32	1639,548	41,86	1,28%	Fraca	M.S.
PGE	Exponencial	240,99	305,037	152,78	6,92%	Fraca	M.S.
Pmil	Gaussiano	628,51	712,058	32,79	1,00%	Fraca	M.S.

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos; R^2 = coeficiente de determinação do modelo de semivariograma; IDE = índice de dependência espacial; EPP = Efeito pepita puro; E = grau de aleatoriedade; Peq. = pequena; Sig. = significativa; M.S. = muito significativa.

Em relação ao IDE, os atributos apresentaram classificações bastante variadas para a dependência espacial. A DP2 foi classificada com forte dependência, a RSP2, UG1, UG2, DS1 e DP1 com moderada e a RSP1, PT2, NFE, NGE, PGE e Pmil, com fraca. A componente de aleatoriedade também apresentou classificações variadas, como mostrado na Tabela 16.

A respeito dos modelos teóricos utilizados para modelar a dependência espacial, houve predominância do modelo esférico, através dos atributos: UG1, UG2, DP1, DP2 e NFE; e do modelo gaussiano, através dos atributos: RSP1, RSP2, DS1, NGE e Pmil.

No sistema convencional os maiores alcances para os atributos RSP e DS, foram encontrados na primeira camada avaliada, concordando com o observado por Assis et al. (2009). Tal fato pode ser atribuído à homogeneização do solo em toda área. A RSP apresentou alcances de 17,22 e 7,36 m, para a primeira e segunda camada, nesta ordem. Já a DS1 apresentou 77,74 m. Com relação aos componentes

de rendimento de grãos de milho, a PGE apresentou alcance de 152,78 m.

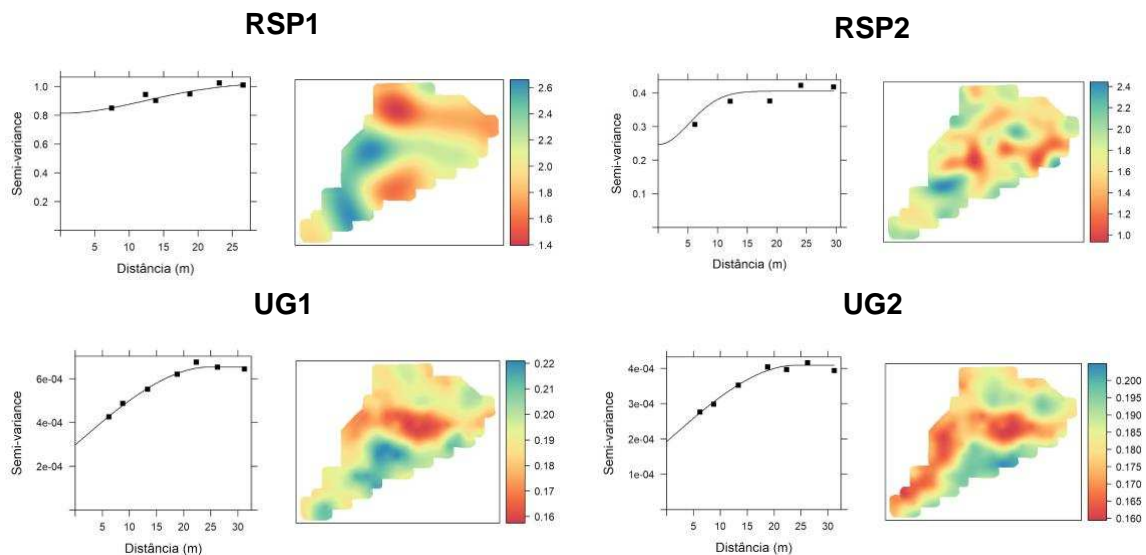
De acordo com Carvalho et al. (2011), tais informações permitem o planejamento de experimentos futuros caso as condições de estudo sejam as mesmas, tendo em vista que o alcance pode ser atribuído parcialmente ao manejo e às características do solo.

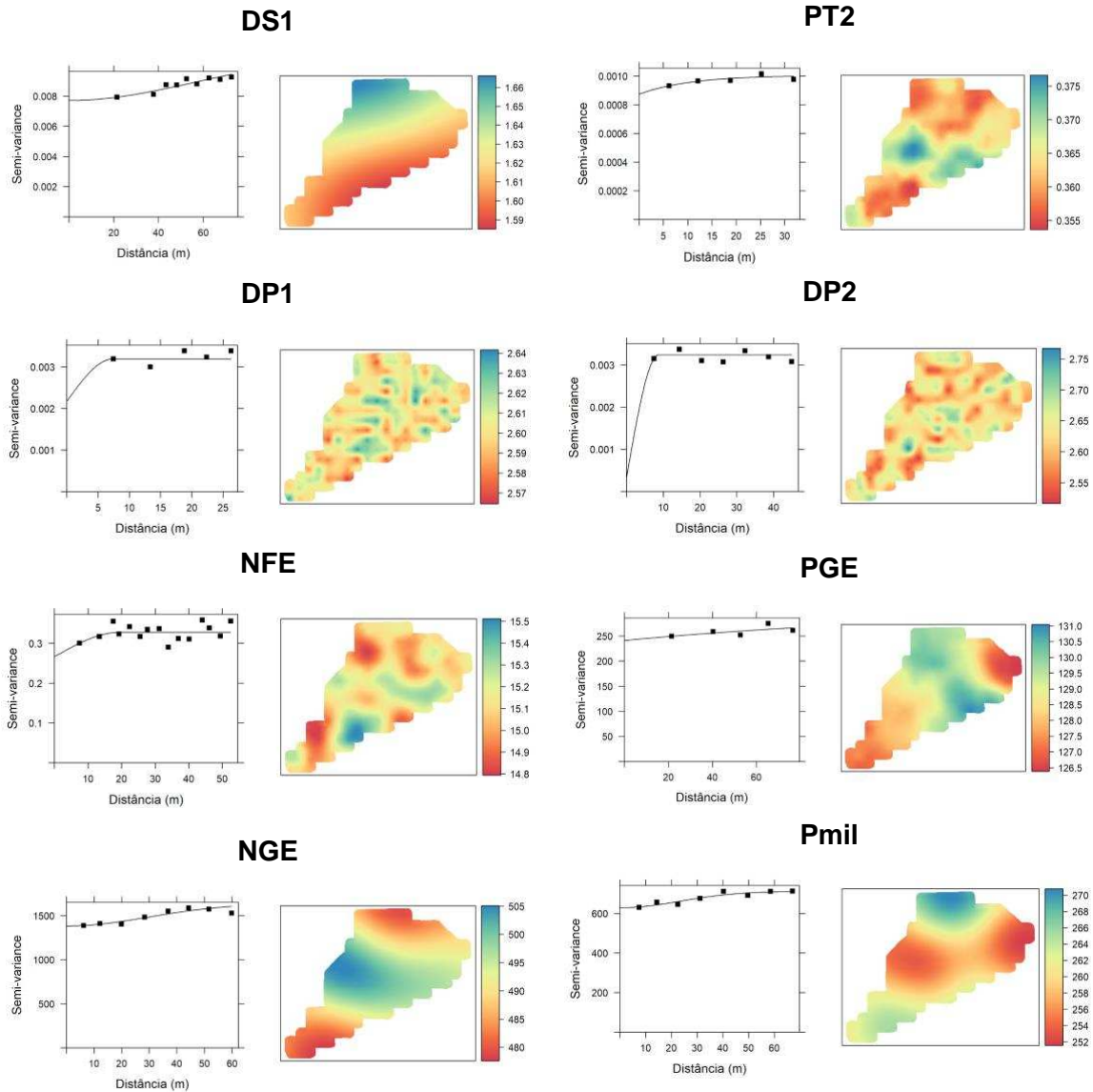
A Figura 27 apresenta os semivariogramas teóricos ajustados das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho, e seus mapas de krigagem apresentando a sua distribuição espacial no sistema de preparo convencional.

Observa-se através dos mapas que, nos locais onde a DS1 alcançou maiores valores, a UG1 alcançou menores. Percebe-se bastante semelhança nas duas profundidades para a UG, fato já esperado pois o par UG1 e UG2, obtiveram correlação com significância positiva (0,58**).

Nota-se que, em localizações onde há maiores valores de RSP, a UG é menor, em ambas as camadas. O mesmo pode ser observado para a DS e a PT, reforçando a ideia que a medida que a DS aumenta a PT diminui significativamente. Isto pode ser explicado pelo fato da compressão do solo reduzir o tamanho dos poros, aumentando a densidade. A ideia inversa também é observada. Tal fato já era esperado, visto que, foram observadas correlações com significância negativa entre os pares: RSP1 e UG2 (-0,30**), DS1 e PT1 (-0,92**), DS2 e PT2 (-0,81**).

Figura 27 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus respectivos mapas de krigagem no sistema de preparo convencional





RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos.

De acordo com Campos et al. (2009), tais informações são de suma importância para a realização de um planejamento agrícola com êxito, e podem ser utilizadas como parâmetros para aplicação de práticas de manejo em áreas específicas, sejam na descompactação, aplicação de fertilizantes, definição de áreas de manejo ou demais tomadas de decisão.

b) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE PREPARO CONVENCIONAL

A seguir é apresentada a Tabela 17 com o resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de preparo convencional.

Tabela 17 – Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de preparo convencional

Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
PGE = $f(RSP1)$	Gaussiano	- 0,6134	- 0,5836	24,85	2,57%	Fraca	Peq.
PGE = $f(RSP2)$	Exponencial	0,0678	0,80487	22,33	1,64%	Forte	Peq.
PGE = $f(UG1)$	Esférico	0,1691	- 0,02757	23,39	1,33%	Forte	Peq.
PGE = $f(UG2)$	Exponencial	0,0032	0,00721	20,90	4,78%	Moderada	Peq.
PGE = $f(DS1)$	Exponencial	- 0,0056	0,09132	21,64	3,15%	Forte	Peq.
PGE = $f(DP1)$	Gaussiano	- 0,0659	- 0,030217	23,36	2,30%	Fraca	Peq.
PGE = $f(DP2)$	Exponencial	0,1113	0,1575	17,38	0,65%	Forte	Peq.
PGE = $f(PT2)$	Esférico	0,0748	0,0826	26,69	0,79%	Fraca	Peq.

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; R^2 = coeficiente de determinação do modelo de semivariograma; IDE = índice de dependência espacial; E = grau de aleatoriedade, M.S. = muito significativa, Peq. = pequena.

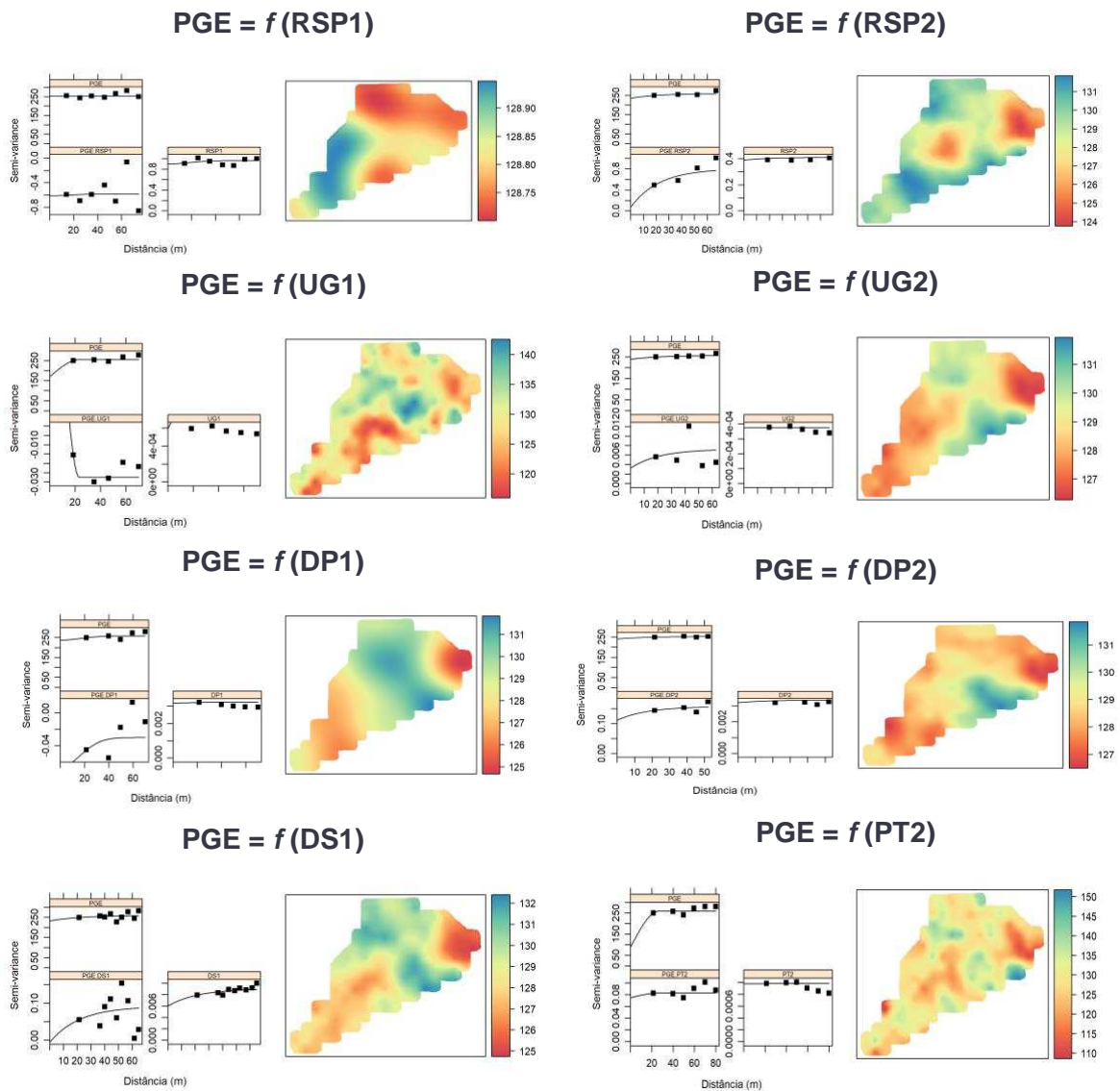
Com exceção da PGE = $f(UG2)$ que apresentou dependência espacial moderada, nos demais pares analisados foi detectada a dependência espacial forte. Houve diversificação com relação aos modelos de semivariograma que melhor se ajustaram aos atributos analisados, sendo que a RSP1 e a DP1 foram ajustadas pelo modelo gaussiano, a RSP2, a UG2 e a DS1 pelo modelo exponencial e a UG1 E a PT2 pelo modelo esférico.

Foram encontrados valores para o alcance indo de 17,38 m para a DP2 até 24,85 m para a RSP1. Assim, sugere-se que, para trabalhos futuros que utilizem características semelhantes à estas, os valores dos alcances a serem utilizados estejam compreendidos na amplitude descrita, por representarem a distância dentro da qual os valores dos atributos são iguais entre si, como sugerido por Montanari et al. (2013).

A seguir é apresentada a Figura 28 com os semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de preparo convencional.

Através da análise visual dos mapas de isolinhas percebe-se a existência de correlação espacial entre o peso de grãos de milho e os atributos físicos do solo. Foram encontradas correlações espaciais positivas entre a PGE e os atributos: RSP2, UG2, DS1, DP2 e PT2; e negativas entre a PGE e os atributos: RSP1, UG1 e DP1. Tais fatos corroboram com o fato da compactação ter influência negativa na PGE.

Figura 28 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de preparo convencional



RSP_i = resistência do solo à penetração; UG_i = umidade gravimétrica; DS_i = densidade do solo; DP_i = densidade de partícula; PT_i = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga

4.3.3 PLANTIO DIRETO

A) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E DOS COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

A seguir é apresentada a Tabela 18, com o resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de plantio direto.

Tabela 18 – Resumo dos resultados do ajuste dos modelos de semivariograma simples para os atributos físicos do solo e para os componentes de rendimento de grãos de milho mensurados no sistema de plantio direto

Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
RSP1	Esférico	0,4972	0,77459	43,18	11,00%	Moderada	M.S.
RSP2	Exponencial	0,6669	0,7536	21,97	1,84%	Fraca	M.S.
UG1	Gaussiano	0,0002	0,00037	46,03	31,68%	Moderada	M.S.
UG2	Esférico	0,0001	0,000269	88,46	41,69%	Moderada	M.S.
DS1	Exponencial	0,0029	0,0057	20,75	18,39%	Moderada	M.S.
DS2	Exponencial	0,0023	0,00569	47,45	25,76%	Moderada	M.S.
DP1	EPP	0	0,0027	4,68	7,29%	EPP	EPP
DP2	EPP	0	0,0039	6,13	12,15%	EPP	EPP
PT1	Exponencial	0,00031	0,0008	30,43	19,57%	Moderada	M.S.
PT2	Exponencial	0,0005	0,00089	24,67	18,34%	Moderada	M.S.
Componentes de rendimento de grãos de milho							
NFE	Gaussiano	0,3953	0,4729	13,83	0,20%	Fraca	M.S.
NGF	Gaussiano	6,8296	11,845	99,76	11,87%	Moderada	M.S.
NGE	Gaussiano	1991,51	4505,339	125,77	15,39%	Moderada	M.S.
PGE	Gaussiano	367,138	885,188	64,53	34,65%	Moderada	M.S.
Pmil	Gaussiano	955,99	2059,535	56,25	31,21%	Moderada	M.S.

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos; R^2 = coeficiente de determinação do modelo de semivariograma; IDE = índice de dependência espacial; EPP = Efeito pepita puro; E = grau de aleatoriedade; Peq. = pequena; Sig. = significativa; M.S. = muito significativa.

Os atributos DP1 e DP2 com alcances 4,68 e 6,13 m nesta ordem, apresentaram distâncias menores que o raio de busca utilizado para as amostras desta área, de 7,0 m, caracterizando efeito pepita puro. Pode-se considerar que a

malha utilizada foi adequada, pois conseguiu captar a dependência espacial em 13 dos 15 casos analisados.

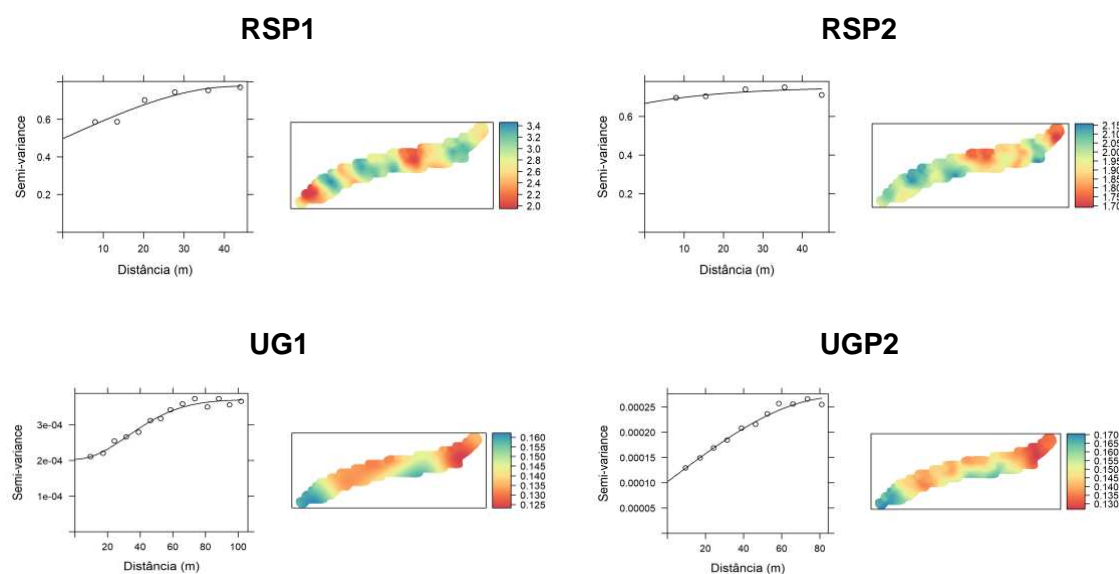
De acordo com a Tabela 18, com relação ao IDE, houve predominância de dependência espacial moderada, através dos atributos: RSP1, UG1, UG2, DS1, DS2, PT1, PT2, NGF, NGE, PGE e Pmil. Os atributos RSP2 e NFE apresentaram dependência espacial fraca. A componente de aleatoriedade foi considerada muito significativa para todos os atributos avaliados.

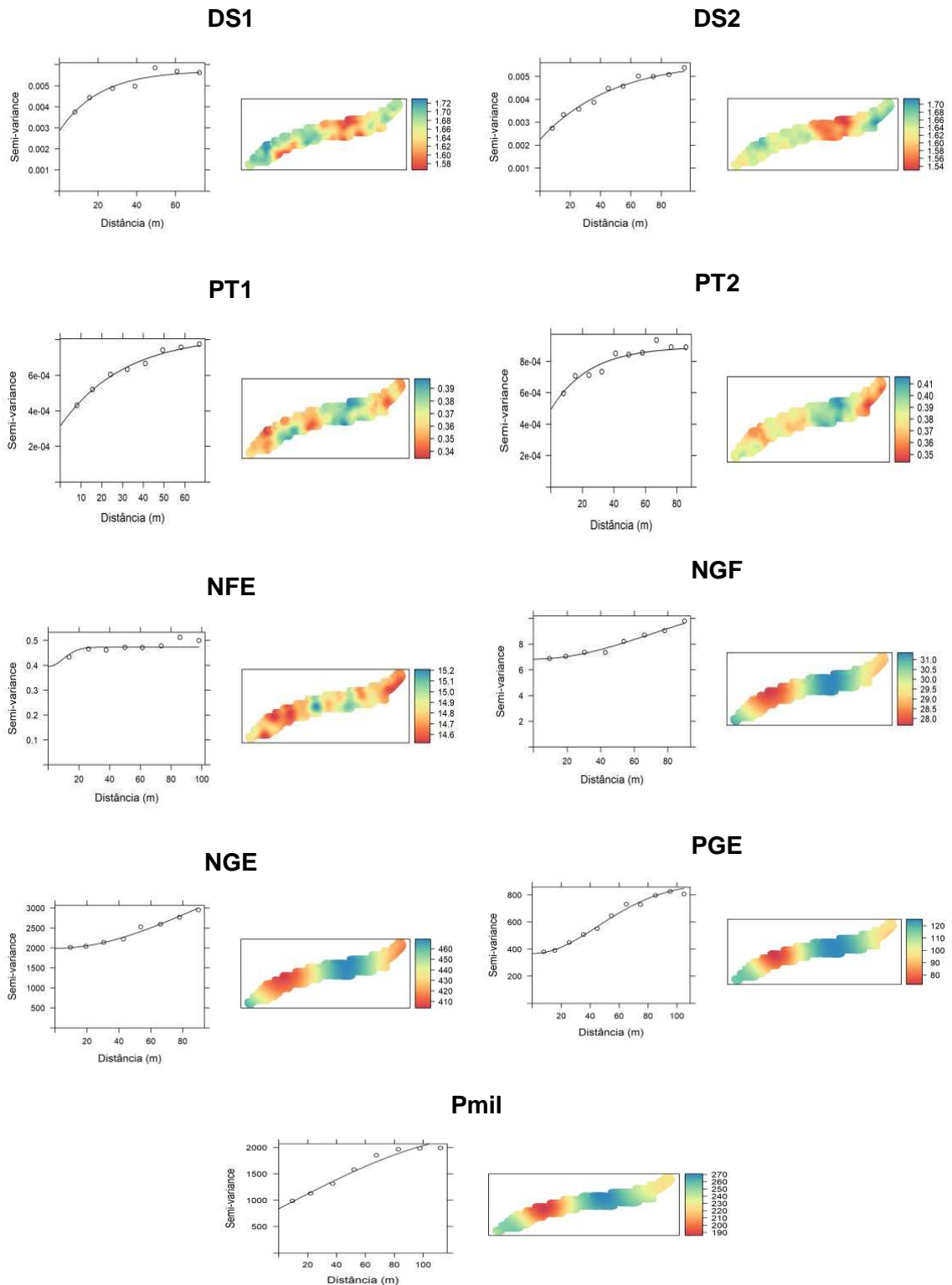
Com relação aos modelos teóricos utilizados para modelar a dependência espacial, houve predominância do modelo exponencial para os atributos físicos do solo, a ver: RSP2, DS1, DS2, DP1, DP2, PT1 e PT2; e do modelo gaussiano para todos os coeficientes de rendimento.

Em relação à RSP, os valores encontrados para o alcance diminuíram à medida que se aproximaram da superfície. Já a UG acompanhou uma tendência inversa, fatos que podem ser explicados pela matéria orgânica presente no plantio direto. Com relação aos componentes de rendimento de grãos de milho, a PGE apresentou alcance de 64,53 m.

A seguir é apresentada a Figura 29 com os semivariogramas teóricos ajustados das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho, e seus mapas de krigagem apresentando a sua distribuição espacial no sistema de plantio direto.

Figura 29 - Semivariogramas das propriedades físicas do solo e dos componentes de rendimento de grãos de milho e seus mapas de krigagem no sistema de plantio direto





RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; NFE = número de fileiras por espiga; NGF = número de grãos por fileira; NGE = número de grãos por espiga; PGE = peso de grãos por espiga; Pmil = peso de mil grãos.

Nota-se bastante semelhança nas duas profundidades para a UG, DS e PT, fato já esperado pois obtiveram correlação com significância positiva os pares UG1 e UG2 (0,84**), DS1 e DS2 (0,37**) e PT1 e PT2 (0,36**).

Percebe-se que, em localizações onde há maiores valores de RSP, a UG é menor, em ambas as camadas. O mesmo pode ser observado entre a DS e a PT. Tais fatos já eram esperado, visto que, foram observadas correlação com significância negativa entre os pares: RSP1 e PT1 (-0,19*), RSP1 e PT2 (-0,24**), UG2 e DS2 (-0,17*), DS1 e PT1 (-0,82**), DS2 e PT1 (-0,39**), DS2 e PT2 (-0,87**), concordando com os resultados encontrados por Mentgnes et al. (2010).

Segundo os autores, a intensidade do tráfego de máquinas agrícolas em plantio direto ocasiona compactação do solo com efeito negativo nas propriedades físicas e hídricas do solo, com redução principalmente da porosidade total. Albuquerque et al. (2001) destacaram que um solo mais compactado pode reduzir a produtividade de algumas culturas, e que cultura do milho é considerada sensível a todo este processo.

b) ANÁLISE DOS SEMIVARIOGRAMAS CRUZADOS ENTRE O PESO DE GRÃOS POR ESPIGA E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO COM SEUS RESPECTIVOS MAPAS DE COKRIGAGEM NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

A seguir é apresentada a Tabela 19 com o resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de plantio direto.

Tabela 19 – Resumo dos resultados do ajuste dos semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo no sistema de plantio direto

Atributo	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar ($C_0 + C_1$)	Alcance (A_0)	R^2	IDE	E
Atributos físicos do solo							
PGE = $f(RSP1)$	Exponencial	2,888	- 6,2524	34,96	36,53%	Forte	Peq.
PGE = $f(RSP2)$	Gaussiano	-1,968	- 0,7335	34,96	34,97%	Fraca	Peq.
PGE = $f(UG1)$	Gaussiano	- 0,01214	0,10748	28,39	34,92%	Forte	Peq.
PGE = $f(UG2)$	Gaussiano	- 0,0371	0,09496	28,39	35,58%	Forte	Peq.
PGE = $f(DS1)$	Exponencial	- 0,160	0,0900	13,95	33,69%	Forte	Peq.
PGE = $f(DS2)$	Exponencial	0,0867	- 0,19705	17,49	34,11%	Forte	Sig.
PGE = $f(PT1)$	Exponencial	0,00846	- 0,04027	14,65	33,64%	Forte	Peq.
PGE = $f(PT2)$	Exponencial	- 0,01076	0,070279	12,98	34,13%	Forte	Peq.

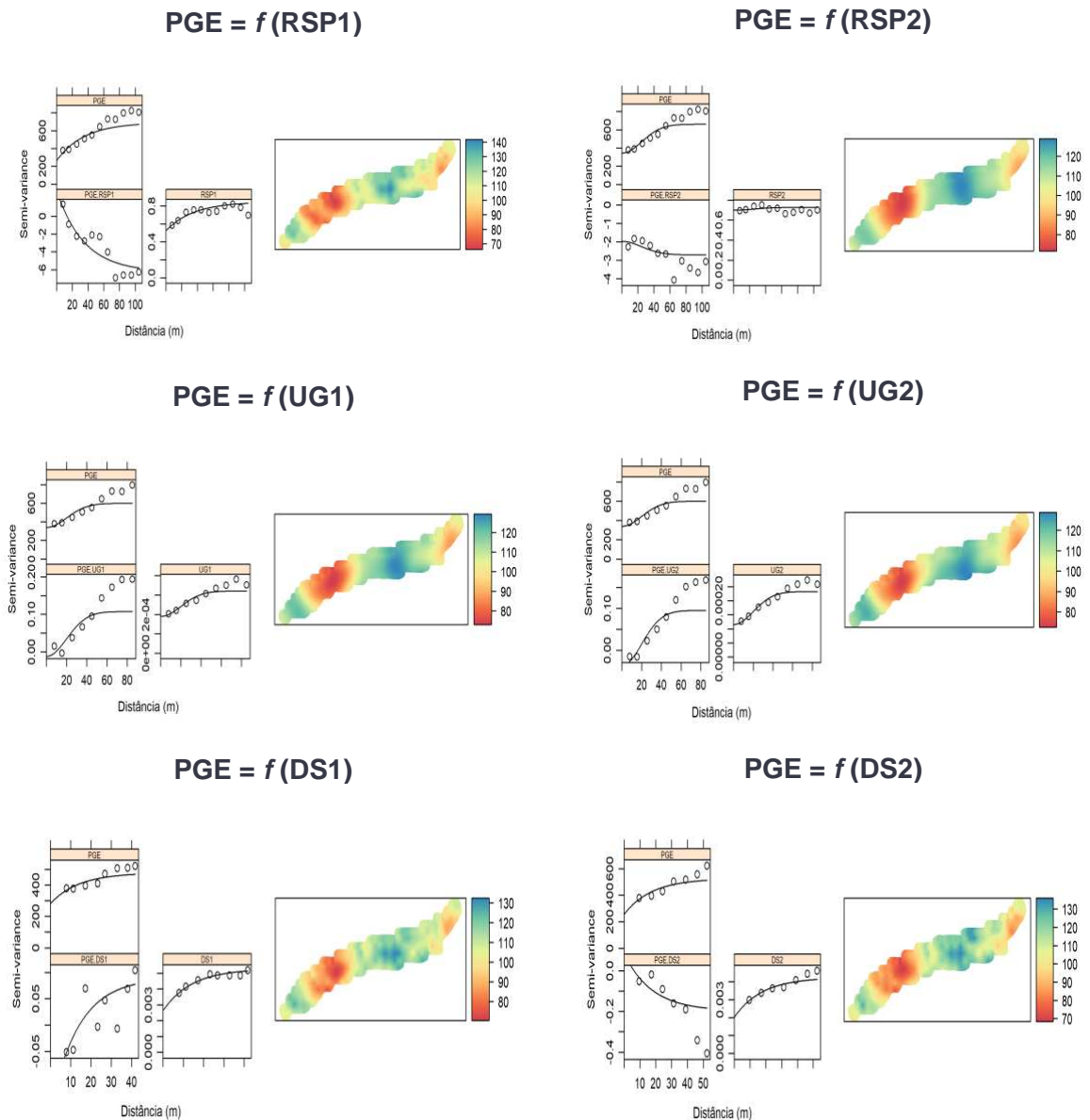
RSP_i = resistência do solo à penetração; UG_i = umidade gravimétrica; DS_i = densidade do solo; DP_i = densidade de partícula; PT_i = porosidade total, $i = 1 = 0 - 0,15$ m de profundidade, $2 = 0,15 - 0,30$ m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga; R^2 = coeficiente de determinação; IDE = índice de dependência espacial; E = grau de aleatoriedade, M.S. = muito significativa, Peq. = pequena.

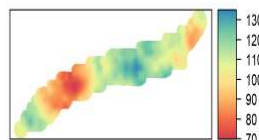
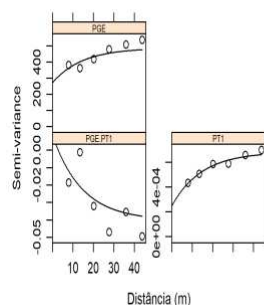
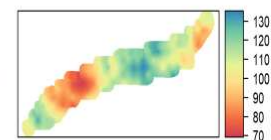
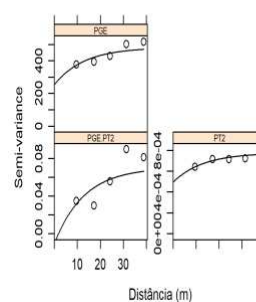
Assim como em trabalho de Montanari et al. (2013), para todos os pares formados nos semivariogramas cruzados foi detectada dependência espacial forte. Houve predominância de ajuste pelo modelo exponencial para os atributos: RSP1, DS1, DS2, PT1 e PT2; e pelo modelo gaussiano para os atributos: RSP2, UG1 e UG2.

Foram encontrados valores para o alcance indo de 17,49 m para os atributos DS1, DS1, DP1 e PT2, até 34,96 m para a RSP1 e a RSP2.

A seguir é apresentada a Figura 30 com os semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de plantio direto.

Figura 30 - Semivariogramas cruzados entre o peso de grãos por espiga e os atributos físicos do solo com seus respectivos mapas de cokrigagem no sistema de plantio direto



PGE = f(PT1)**PGE = f(PT2)**

RSPi = resistência do solo à penetração; UGi = umidade gravimétrica; DSi = densidade do solo; DPi = densidade de partícula; PTi = porosidade total, i = 1 = 0 – 0,15 m de profundidade, 2 = 0,15 – 0,30 m de profundidade; PGE = peso de grãos por espiga

Foram encontradas correlações espaciais positivas entre a PGE e os atributos: UG1, UG2, DS1 e PT2; e negativas entre a PGE e os atributos: RSP1, RSP2, DS2 e PT1. Tais fatos corroboram com os resultados encontrados na avaliação da correlação linear, onde foram encontradas correlações com significância positiva entre os pares: UG1/PGE e UG2/ PGE.

5 CONCLUSÕES

A média não é suficiente para representar a distribuição dos atributos analisados que apresentaram dependência espacial.

Os atributos físicos do solo analisados não variaram aleatoriamente e apresentaram variabilidade entre alta, média e baixa dos dados, seguindo padrões espaciais bem definidos.

As malhas de amostragem utilizadas foram adequadas pois permitiram representar a dependência espacial dos atributos analisados, possibilitando a criação dos mapas de isolinhas para observação da distribuição espacial dos atributos nas áreas experimentais.

Constatou-se que, quanto mais elevados são a resistência à penetração e a densidade do solo, mais compactada a sua estrutura se mostra e menor porosidade total é apresentada. Tal fato foi constatado em todos os sistemas de preparo de solo analisados.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo pela geoestatística, utilizando a técnica da krigagem, mostrou-se eficiente na geração de mapas georreferenciados.

Os valores de alcance encontrados nos semivariograma simples para o peso de grãos por espiga foram maiores no sistema de preparo convencional, seguido pelo cultivo mínimo e pelo plantio direto, respectivamente.

Os semivariograma cruzados reproduziram satisfatoriamente o comportamento dos atributos que apresentaram dependência espacial no mesmo padrão dos semivariograma simples, possibilitando seu uso para estimar o peso de grãos por espiga.

REFERÊNCIAS

ACOCK, B.; PACHEPSKY, Y. Holes in precision farming: mechanistic crop models. In: **Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSSA**, Madison, p. 397-404, 1997.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L. e ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.25, n.3, 2001.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C.; NOVOTNY, E. H. Preparo do Solo Convencional. Embrapa Milho e Sorgo, 2002. (Embrapa Milho e Sorgo: Cultivo do Milho).

Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/487001/1/Com40.pdf>.

Acesso em: 30 de março de 2020.

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

ALVES, S.M. F; DE QUEIROZ, D.M.; DE ALCÂNTARA, G.R.; DOS REIS, E.F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, p. 22-30, 2014. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, p. 22-30, 2014.

ALTIKAT, S.; CELIL, A. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions. **Soi & Tillage Research**, v. 114, p. 11-19, 2011.

AMADO, T.J.C; SANTI, L.A.; VEZANI, F. Agricultura de precisão como ferramenta de aprimoramento do manejo do solo. **Revista Plantio Direto**. Ed. Aldeia Norte, Passo Fundo, RS. 2004.

AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L. V.; MOREIRA, J. H.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007.

ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. V. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. G. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras/MG, v.29, n.2, p.322-329, 2005.

ANTOLINI, L. S.; SCARE, R. F.; DIAS, A. Adoption of precision agriculture technologies by farmers: A systematic literature review and proposition of an integrated conceptual framework. In: **IFAMA World Conference June**, p. 14-17, 2015.

AQUINO, R. E. D.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A. D.; TEIXEIRA, D. D. B.; CUNHA, J. M. D. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 21-30, 2015.

ARAÚJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; LIMA, M. G. D. S.; FEITOSA, J. V.; SILVA, F. J. A. D.; NESS, R. L. L.; NESS, R. L. L.; FRISCHKORN, H.; SIMPLÍCIO, A. A. F.; KERNTOPF, M. R. Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 754-762, 2013.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.

ASSIS, R.L. de; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 507-514, 2005.

ASSIS, R.L. de; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K.P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

ASSUMPÇÃO, R. A. B.; URIBE-OPAZO, M. A.; GODOY, E.; JOHANN, J. A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade da produtividade de soja segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum: Agronomy**, vol. 29, p. 165-171, 2007.

AVILA, O. V.; FERNÁNDEZ, I. M.; COSTA, H. N. R.; SANTOS, R. C.; RIBEIRO, P. R. E.; MELO, V. F., FILHO, A. A. Phytometal Availability, Evaluation of Antioxidant Activity and Total Phenolic Compounds of *Genipa americana* L. (Rubiaceae) Fruits. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 5, 2018.

AZEVEDO, C. A. V. de; PORDEUS, R. V.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, M. R. Q. de A.; Lima, V. L. A. de. Dependência espacial da qualidade da água subterrânea no

perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, n.2, p.129-136, 2012.

BAILEY, T. C.; GATTREL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. London: Prentice Hall, 432 p.,1995.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA, C. M. A. D.; SOUZA, F. R. D. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 299-305, 2010.

BORSSOI, J.; URIBE-OPAZO, M.; GALEA, M. Técnicas de diagnóstico de influência local na análise espacial da produtividade da soja. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 376- 387, 2011.

BOWMAN, M. T.; BECK, P. A.; WATKINS, K. B.; ANDERS, M. M.; GADBERRY, M. S.; LUSBY, K. S.; GUNTER, S. A.; HUBBELL, D. S. Tillage systems for production of small-grain pasture. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 1289-1295, 2008.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. F. Bastos, 1989.

BRAMLEY, B. G. V.; HILL, P. A.; THORBURN, P. J.; KROON, F. J.; PANTEN, K. Precision agriculture for improved environmental outcomes: Some Australian perspectives. **European Journal of Agriculture and Forestry Research**, v. 3, p. 161-178, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. 398p. Brasília, 2009.

BUBLITZ, U. **Evolução do sistema plantio direto no Paraná**. Foz do Iguaçu: FEBRAPDP/ MATER, 2014. Disponível em:
http://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf.
Acesso em 31 de março de 2020.

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

CAMARGO, L. A.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2279-2288, 2008.

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

CAMPOS M.C.C.; MARQUES J. J.; GENER, T. P.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia. Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 297-304, 2009.

CANARACHE, A. P. Um modelo semi-empírico generalizado que estima a resistência do solo à penetração. **Pesquisa de solo e lavoura**, v. 16, n. 1-2, p. 51-70, 1990.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. D. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p.935-944, 2003.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. D. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 613-622, 2011.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CARNEIRO, F. M.; FURLANI, C. E. A.; GÍRIO, L. A. S.; SILVA, R. P.; MALHEIROS, E. B. Mechanized and individualized application of n-p-k in combined operations in sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, p. 676-688, 2017.

CARVALHO, J. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; ATHAYDE, M. L. F.; ARF, O.; DE SÁ, M. E. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 39, p. 47-53, 2004.

CARVALHO FILHO, A.; BONACIM, J. L. G.; CORTEZ, J. W.; CARVALHO, L. C. C. Mobilização de um latossolo vermelho acriférrico em função de sistemas de preparo do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 1-7, 2008.

CARVALHO, L.A.; SILVA, C.A.S.; NUNES, W.A.G.A.; MEURER, I.; SOUZA, W.S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no centro-oeste do Brasil. **Revista de Ciência Agrárias**, n.2, v.8, p. 54-62. 2011.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

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

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, p. 211-218, 2009.

COELHO, A.M.; DORAN, J.W.; SCHEPERS, J.S. Produtividade irrigada do milho em relação à variabilidade espacial das propriedades selecionadas do solo. **Agricultura de precisão**, n. precisionagric4a, p. 441-452, 1999.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.243-290, 2003.

COELHO, E. C.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p.165-174, 2009.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p.1663-1674, 2006.

COLVIN, T.S.; JAYNES, D.B.; KARLEN, D.L.; LAIRD, D.A.; AMBUEL, J.R. Variabilidade de produção de seis anos em um campo central de Iowa. **Agricultura de precisão**, n. precisionagricu3, p. 583-583, 1996.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2020, **12º Levantamento - Safra 2019/2020**. <http://www.conab.gov.br/conabweb/>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.777-788, 2005.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, 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**, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

COUTO, E. G.; SCARAMUZZA, J. F.; MARASCHINI, L. Influência dos métodos de interpolação dos dados nos mapas usados na agricultura de precisão. **Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão**, v. 2, p. 1-5, 2002.

CRUZ, J. S.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 34, p. 271-278, 2010.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.1-7, 2002.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 589-602, 2011.

CZYŻ, E.A.; DEXTER, A.R. Soil physical properties as affected by traditional,

reduced and no- tillage for winter wheat. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, p. 319-326, 2009.

DAMPNEY, P.M.R.; MOORE, M. Agricultura de precisão na Inglaterra: práticas atuais e conselhos baseados em pesquisas para agricultores. In: **Anais da Quarta Conferência Internacional sobre Agricultura de Precisão**. Madison, WI, EUA: Sociedade Americana de Agronomia, Sociedade de Ciência de Culturas da América, Sociedade de Ciência de Solo da América, p. 661-673, 1999.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573p., 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 356p., 2018.

ENTIN, J. K.; ROBOCK, A.; VINNIKOV, K. Y.; SRINIVASAN, G.; HOLLINGER, S. E.; SPERANSKAYA, N. A.; NAMKHAI, A. The global soil moisture data bank. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 6, p. 1281-1300, 2000.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.1, 2014.

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

FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 117 p., 2001.

FIORI, A.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica de solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Editora da UFPR, 2001.

FLATMAN, G.T.; YFANTIS, A.A. Geostatistical strategy for soil sampling: the survey and the censos. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.4, p 335-349, 1984.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J.

Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, p. 113-121, 2006.

FURLANI, C. E. A.; GAMERO, C. A.; LEVIEN, R.; LOPES, A.; SILVA R. P. Desempenho operacional de uma semeadora-adubadora de precisão, em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.2, p.388-395, 2004.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras, MG: UFLA, FAESPE, 261p., 2001.

GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A. C. S.; STROHHAECKER, L.; HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, v. 30, p. 953-95, 2000.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. Milho: do plantio à colheita. 2. Ed. **Viçosa: UFV**, 2017.

GOLDIN, A.; LAVKULICH, L. M. Historical land clearing in the fraser lowland of British Columbia and Washington State: 1. Effects on soil genesis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 467-473, 1988.

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

GRÄLER, B.; PEBESMA, E.; HEUVELINK, G. Spatio-Temporal Interpolation using *gstat*. **The R Journal**, v. 8, n. 1, p. 204–218, 2016.

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

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, C.H.; DECHEN S. C. F. Variabilidade espacial e temporal do rendimento das culturas e algumas

propriedades do Rhodic Hapludox sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1-14, 2010.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JUNIOR, P. J. R.. Influência da incorporação da anisotropia geométrica na construção de mapas temáticos de dados simulados e atributos químicos do solo. **Revista Chilena de Pesquisa Agrícola**, v. 73, n. 4, pág. 414, 2013.

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

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

GUIMARÃES, R.M.L.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; BLAINSKI, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 657-669, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário, 2017. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6640#resultado>. Acesso em 30 de março de 2020.

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

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

JUNIOR, D. D. V.; BIACHINI, A.; VALADÃO, F. C. A.; ROSA, R. P. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p. 171-177, 2014.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KAMIMURA, K. M., SANTOS, G. R. D., OLIVEIRA, M. S. D., DIAS JUNIOR, M. D. S.; GUIMARÃES, P. T. G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 877-888, 2013.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data. **Precision Agriculture**, v.9, p.33-56, 2008.

KHAN, M. J.; RASHID, M.; ALI, S.; KHATTAK, I.; NAVEED, S.; HANIF, Z.; MOHAMMAD J. Mapping of Variability in Major and Micro Nutrients for Site-Specific Nutrient Management. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 3, n. 3, p. 303-329, 2014.

KIM, H.; ANDERSON, SH; MOTAVALLI, PP; GANTZER, CJ. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v.160, p.244-251, 2010.

KING, J. A.; BRADLEY, R. I.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, R. M.; MAYR, T. R.; WHEEJER, H. C. Mapping Potential Crop Management Zones within Fields: Use of Yieldmap Series and Patterns of Soil Physical Properties Identified by Electromagnetic Induction Sensing. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 167-181. 2005.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: com un estudio de los climas de la tierra (Tradução: Pedro R. Hendrichs Pérez). Buenos Aires, p.168-169, 1931.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. Um estudo comparativo dos métodos de interpolação para o mapeamento das propriedades do solo. **Revista de Agronomia**, v. 91, n. 3, p. 393-400, 1999.

KRIGE, D. G. A. Statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, Johannesburg, v. 6, n. 52, p. 119-139, 1951.

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

LEITE, M. H. S.; COUTO, E. G.; AMORIM, R. S. S.; COSTA, E. L. D.; MARASCHIN, L. Perdas de solo e nutrientes num Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico, com

diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 689-699, 2009.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2016.

LIMA, C. L. R., PAULETTO, E. A., DA SILVA GOMES, A., HARTWIG, M. P., PASSIANOTO, C. C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 12, 2006.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S. SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de tributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**. vol.34, n.1, p. 127-136, 2010.

LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; SILVA, S. D. A.; KUNDE, R. J. Physical indicator of soil quality of alfisol under conventional system of physic nut. **Bioscience Journal**, v.28, n.1, p. 203-211, 2012.

LITTLE, T.M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. New York, John Wiley & Sons, 1978.

LLANILLO, R. F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p. 205-220, 2006.

MACHADO, A. L. T.; REIS A. V.; MORAES M. L. B.; ALONÇO A. S. **Máquinas de preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**, 2 ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 253p., 2005.

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

MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W.J. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1177-1182, 2000.

MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R.B.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob

cultivo de café, em Patrocínio, MG. **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: L. A Balastreire, p. 105-12, 2000.

MARTINS, M. V.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul, **Acta Scientiarum Agronomic**, v.31, p.147-154, 2009.

MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; ANDRADE, F. R.; BAPTISTEL, A. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista/RO, v. 9, n. 1, p. 17-26, 2015.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economy Ecology**, Lancaster, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MELO, R. S de S.; SILVA, A. S.; SILVA, I. de F; SOUZA, M. A.; SILVA NETO, L. de F. Sistemas de culturas com milho sob semeadura direta na região Nordeste do Brasil. **Ciência Rural**, v. 43, n. 9, p. 1535-1541, 2013.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 315-321, 2010.

MCKNIGHT, P.E; MCKNIGHT. K. M.; SIDANI, S.; FIGUEREDO, A.J. **Dados ausentes: uma introdução suave**. Guilford Press, 2007.

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.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Estabelecendo zonas de manejo usando condutividade elétrica do solo e outras propriedades do solo pela técnica de agrupamento difuso. **Scientia Agricola** , v. 65, n. 6, p. 567-573, 2008.

MOLIN, J. P.; DO AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. **Agricultura de precisão**. Oficina de Textos, 2015.

MONIZ, A. C. Elementos de Pedologia, Rd. **Polígono**, São Paulo, 1975.

MONTANARI, R.; NAGEL, P. L.; DA LUZ, A. P.; DA SILVA, E. N. S.; DA SILVA REZENDE, I.; DA SILVA, L. V.; ROQUE, C. G. Correlação espacial e temporal de atributos físicos do solo com a produtividade do feijão em Chapadão do Sul-MS. **Agrarian**, v. 6, p. 289-302, 2013.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S. J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1315-1326, 2014.

MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; VIEIRA, S. R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 996–1003, 2011.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MULLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 120-124, 2011.

NETO, G. K.; OLIVEIRA, A. H.; PEREIRA, S. Y. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma sub-bacia as margens do rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências**, v. 36, p. 381-394, 2017.

NOETZOLD, R.; SILVA, L. M.; SCHONINGER, E. L.; TOMÉ, P. C. D.; ALVES, M. C. Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo durante cinco safras. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 6, p. 328-345, 2018.

OLIVER, M. A. Exploring soil spatial variation geostatistically. In: **Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture**. Odense, Denmark, Sheffield Academic Press, ISBN, p.03-18, 1999.

OLIVEIRA, S. M. D.; LIMA, P. R.; VERBURG, J. E. E. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquido suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 280–285, 2015.

OLIVEIRA, D. G.; REIS, E. F.; MEDEIROS, J. C.; OLIVEIRA MARTINS, M. P.; SILVA UMBELINO, A. Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 12, p. 1-10, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO (FAO). Disponível em <http://www.fao.org/>. Acesso em: 25 maio de 2020.

PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

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

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

QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; ZANDONADI, R. S.; EMERICH, I. N.; SENA JÚNIOR, D. G. Uso de técnicas de agricultura de precisão para a cafeicultura de montanha. In: **Zambolim, L. Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café**. Viçosa: Editora UFV, Cap.3, p.77-108, 2004.

R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.

RABELO, N. A. **Método de Análise** (Cadernos Didáticos; 12) Goiânia: Ed. UCG, 88p., 2000.

RAMOS, A. M. R.; AMORIM, B. M. B.; FREIRE, C. T. M.; LIMA, D. L. F. A. Atributos físicos do solo em sistema consorciado e monocultivo do maracujá (*Passiflora edulis Sims*). **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 1, p. 80-87, 2019.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 80, p. 1609-1623, 2007.

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

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & tillage research**, v.102, p.242-254, 2009a.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 310-319, 2009b.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LU, X. Indicators of good physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n.1, p.131- 146, 2002.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; PEREIRA, G. T. Densidade e resistência à penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.13-17, 2003.

RODRIGUES, M. S.; CORA, J. F.; FERNANDES, C. Relações espaciais entre atributos do solo e produção de milho em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 599-609, 2012.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.5, p. 821-828, 1999.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, p. 1095-1103, 2009.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. D.; SANTOS, H. D.; KER, J. C.; ANJOS, L. D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5ª edição. **Revista e ampliada. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2005.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; REPASSI, R. M. A.; MALLER, C. T. M.; MALLER, A.; MATOS, F. A. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.3, p.313-321, 2006.

SANTOS, G.A.; PEREIRA, A.B.; KORNDÖRFER, G.H. Uso do sistema de análises

por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, 2010.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 169–177, 2008.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 85-91, 2000.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. Uma análise de teste de variância para normalidade (amostras completas). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHIRATSUCHI, L. S. Geração de mapas de produtividade para experimentos com milho no âmbito de fazenda. **Embrapa Cerrados-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2003.

SHIRATSUCHI, L. S.; MARCHÃO, R. L.; JERKE, C.; RESENDE, A. V. D.; FONTES, J. R. A.; OLIVEIRA, C. D.; HURTADO, S. M. C. Geração de mapas multitemáticos em agricultura de precisão. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2007.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.855-860, 2002.

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**, v. 27, p. 1013-1020, 2003.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, p. 544-552, 2005.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; INHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1-10, 2008a.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idésia**, Chile, v.26, n.2, 2008b.

SILVA, S. D. A.; LIMA, J. S. D. S. SOUZA, G. S. D. OLIVEIRA, R. B. D.; SILVA, A. F. D. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2010.

SILVA, S. G. C.; SILVA, Á. P. D.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. D. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 547-555, 2012.

SILVA, E. N.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 598-607, 2015.

SILVA, C.; SANTOS, S. D. S.; SOUZA, D.; GUERRA, J.; ESPINDOLA, J. ARAÚJO, E. D. S. Avaliação de diferentes manejos do solo sobre a produtividade do milho (*Zea mays*) em sistema orgânico de produção. **Embrapa Agrobiologia-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2018.

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.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SOBRINHO, J. F.; ROSS, J. L. S. O processo de erosão em ambiente de superfície sertaneja-varjota (CE). **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, n.21, p. 53 - 66, 2007.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **A glossary of soil science terms**. Madison, 34 p. 1997.

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**, n.25, p.699- 707, 2001.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, p. 27-34, 2008.

SOUZA, Z. M. D.; SOUZA, G. S. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, 2014.

STEEL, R. G.; TORRIE, J. H. **Princípios e procedimentos estatísticos: uma abordagem biométrica**. McGraw-Hill, 1986.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, 34:755- 760, 2004.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. D. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

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

TAYLOR, H. M., ROBERTSON, G. M., PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, New York,

v.102, p.18-22, 1966.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas/MG, v.22. n.2, p.301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an Oxisol managed by different soil tillage systems. **Scientia Agrícola**, v. 59, p. 795-801, 2002.

TORRES, J. L. R.; COSTA, D. D. A; SILVA NETO, O. F.; ARAÚJO, A. S.; SILVA, V. R.; VIEIRA, D. M. S. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num latossolo sob semeadura direta há doze anos. **Global Science and Technology**, Rio Verde/GO, v. 8, n. 1, p. 131-140, 2015.

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

TUKEY, J. W. **Análise exploratória de dados**. Addison-Wesley, v. 2, 1977.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Feed Grains Database**. Disponível em <<https://www.usda.gov/>> Acesso em: 14 junho de 2020.

VIANA, J., H., M.; **Determinação da densidade de Solos e de horizontes cascalhentos**. Comunicado Técnico - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sete Lagoas/MG, dezembro, 2008. Disponível em: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2008/comunicado/Com_154.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2020.

VIEIRA, S. R. J. L.; HATFIELD, J.; NIELSEN, D.; BIGGAR, J. Teoria geoestatística e aplicação à variabilidade de algumas propriedades agrônômicas. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas, SP. **Bragantia**, vol. 56, p.181-190, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em Estudos de Variabilidade Espacial do Solo. **Tópicos em Ciências do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, vol.1, p.1-53, 2000.

WICKHAM, Hadley. **ggplot2: gráficos elegantes para análise de dados**. Springer, 2016.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 215p., 2013.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F.; FERNANDES JUNIOR, F. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, v. 73, n. 3, p. 300-311, 2014.