

GRACIELLY RIBEIRO DE ALCÂNTARA

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE DE
MILHO E SOJA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS 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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A347v
2015

Alcântara, Gracielly Ribeiro de, 1984-

Variabilidade espacial e temporal da produtividade de
milho e soja e sua relação com atributos do solo / Gracielly
Ribeiro de Alcântara. – Viçosa, MG, 2015.

ix, 82f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Soja - Produção. 3. Milho -
Produção. 4. Solo - Manejo. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

GRACIELLY RIBEIRO DE ALCÂNTARA

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE DE
MILHO E SOJA E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS 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*.

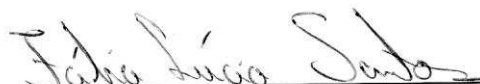
APROVADA: 27 de fevereiro de 2015.



Prof. Elton Filho dos Reis



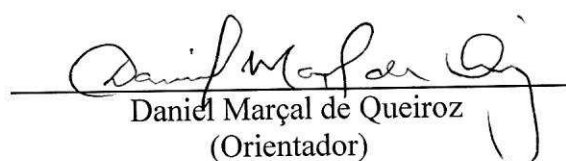
Prof. Nerilson Terra Santos



Prof. Fábio Lúcio Santos



Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Coorientador)



Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Aos meus amados pais Dimas José de Alcântara Filho e Marly Gonçalves Ribeiro de Alcântara, ao meu irmão Marcos Ribeiro de Alcântara, ao meu esposo Michel e aos meus amados avós que não estão mais no meio de nós, Dimas Alcântara, João Ribeiro (João Velho), Georgina Cunha e Maria Rodrigues (Mariíca), exemplos de vida, fé, força, carinho, amor, incentivo e dedicação.

DEDICO.

A Deus e Maria que passam na frente abrindo caminhos e iluminando cada segundo e cada etapa de minha vida.

OFEREÇO.

Para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento...
Tempo para nascer e tempo para morrer.
Tempo para plantar e tempo para colher.
Tempo para chorar e tempo para sorrir.
Tempo para calar e tempo para falar.
Tempo para amar e tempo para odiar.
Tempo para guerra e tempo para a paz.
(Ecl, 3)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa.

Ao Daniel Marçal de Queiroz, pela oportunidade, pela confiança, pelos conselhos, pelo incentivo e pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos coorientadores Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Domingos Sárvio M. Valente e Igor Rodrigues de Assis, pela atenção e sugestões dadas ao trabalho.

À Fazenda Novo Horizonte, na pessoa do Hugo Rafael, pela disponibilização das áreas para a realização deste trabalho.

Aos técnicos e professores do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial aos da área de Mecanização Agrícola, pelos ensinamentos transmitidos e auxílio quando necessário.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) e do Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial (Provisagro), Juliana, Marconi, Danilo, Jardênia, Larissa, Anderson, Remo, André, Flávio, Rafael, Ronaldo, Christian, Robson, Matheus, Anderson Costa, Marcelo, Frederico, Flora, Geice, Eduardo, Wagner, Daniel, Jeszael, Marcus, Humberto, André, Paulo e tantos outros, pela boa convivência, pelas dicas e trocas de ideias, pelo auxílio na utilização de equipamentos e por tornar essa passagem mais agradável.

Aos meus pais Dimas e Marly, pelo carinho, amor, amizade e confiança, e ao meu irmão Marcos, que sempre dizia “você vai aposentar nessa faculdade”.

Aos meus amados avós, Georgina (†) e Dimas (†), Mariica (†) e João Velho (†), que desde criança diziam “...essa Pitucha vai longe...”.

A toda minha família, que sempre confiou e me apoiou. Em especial, à Dindinha Marluce (primeira professora) e ao meu Padrinho Pedro, que acreditaram na minha capacidade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho.

A DEUS e a NOSSA SENHORA, que me ampararam e me deram força e coragem nos momentos de desespero.

Muito Obrigada!

BIOGRAFIA

GRACIELLY RIBEIRO DE ALCÂNTARA, filha de Dimas José de Alcântara Filho e Marly Gonçalves Ribeiro de Alcântara, nasceu em Anápolis – GO, no dia 16 de dezembro de 1984.

Em agosto de 2002, ingressou no curso de Engenharia Agrícola, na Universidade Estadual de Goiás (UEG), diplomando-se em agosto de 2007.

Em agosto de 2008, ingressou no Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Mecanização Agrícola, da Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, concluindo-o em julho de 2010.

Em agosto de 2010, ingressou no programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em nível de doutorado, com concentração na área Mecanização Agrícola.

Atualmente é Professora Efetiva do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Januária, em Januária –MG, atuando na área de Mecanização Agrícola, Agricultura de Precisão e de Construções Rurais e Ambiente.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	iv
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Justificativa.....	5
1.3 Escopo do trabalho	6
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
3 CAPÍTULO I – PADRÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS MAPAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO E SOJA PRODUZIDOS NO CERRADO.....	11
3.1 RESUMO	11
3.2 ABSTRACT	12
3.3 INTRODUÇÃO	12
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.6 CONCLUSÕES.....	31
3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
4 CAPÍTULO II - DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO POR MEIO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO, E MAPAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO E SOJA PRODUZIDOS NO CERRADO.....	34
4.1 RESUMO	34
4.2 ABSTRACT	35
4.3 INTRODUÇÃO	36
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	38
4.4.1 Caracterização da área.....	38
4.4.2 Coleta de dados.....	38
4.4.3 Atributos químicos e físicos do solo	39
4.4.4 Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)	39
4.4.5 Mapa de Produtividade.....	40
4.4.6 Determinação do modelo digital de elevação (MDE)	41
4.4.7 Análise exploratória dos dados.....	42
4.4.8 Análise geoestatística	43
4.4.9 Correlação de Pearson	44
4.4.10 Delimitação das zonas de manejo.....	44

4.4.11	Validação das zonas de manejo delimitadas	45
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.5.1	Análise exploratória dos dados.....	46
4.5.2	Análise geoestatística e mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade.....	51
4.5.3	Correlação de Pearson	58
4.5.4	Delimitação de Zonas de Manejo	61
4.5.5	Validação das zonas de manejo	63
4.6	CONCLUSÕES.....	67
4.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
5	CONCLUSÃO GERAL	73
	APÊNDICES.....	87
6	VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS	75
7	VALIDAÇÃO CRUZADA.....	79

RESUMO

ALCÂNTARA, Gracielly Ribeiro de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2015. **Variabilidade espacial e temporal da produtividade de milho e soja e sua relação com os atributos do solo.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Magalhães Valente e Igor Rodrigues de Assis.

O padrão estabelecido pela variabilidade espacial dos fatores de produção e a produtividade das culturas pode ser levado em conta para delimitação de zonas de manejo. O uso de zonas pode direcionar o plano de amostragem do solo e fornecer informações fundamentais para o manejo do solo. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo analisar as variabilidades espacial e temporal de produtividade de quatro safras das culturas de milho e soja, em sistema de sucessão, em uma área sob plantio direto, e relacionar com atributos do solo. O experimento foi conduzido na fazenda Novo Horizonte, localizada no município de Gameleira de Goiás, GO. O solo da área é o Latossolo Vermelho com textura média a argilosa e declividade de 1 a 5 %. Amostras de solo foram coletadas e a condutividade elétrica aparente (CEa) foi determinada em uma área experimental de 175 hectares, utilizando uma grade amostral regular de 100 x 100 m, totalizando 175 pontos. Os dados de produtividade foram coletados nas safras de 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011 e 2012/2013 por uma colhedora combinada equipada com sistema de mapeamento de produtividade. Os dados de produtividade de cada campo foram filtrados para remoção de valores discrepantes. Valores de produtividade para todos os anos, de atributos de solo, de elevação e de condutividade elétrica aparente do solo, para uma mesma malha regular de 9,94 m x 9,35 m, foram estimados por krigagem. O mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal pode auxiliar a identificar zonas homogêneas de manejo, uma vez que ele pode identificar áreas que apresentam baixa produtividade ou que são instáveis ao longo do tempo. Os mapas do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade, de CEa e o modelo digital de elevação, em conjunto, podem ser utilizados para determinar zonas de manejo, pois se correlacionaram com vários atributos do solo de importância agrônômica.

ABSTRACT

ALCÂNTARA, Gracielly Ribeiro de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 15. **Spatial and temporal variability of corn and soybean yields and their relationships with soil attributes.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisers: Francisco de Assis Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Magalhães Valente and Igor Rodrigues de Assis

The pattern established by spatial variability of production factors and crop yields can be taken into consideration for the delimitation of management zones. The management zones can be used for directing soil sampling pattern and providing key information for the management of soil. In this way, the general objective of this study was to analyze the spatial and temporal variability of corn and soybean crops yields cultivated under a succession system in an area using no-tillage system. The experiment was conducted at the Novo Horizonte farm, located in Gameleira de Goiás, GO. The predominant soil in the area is the Oxisol with medium clay texture with slope of 1 to 5%. Soil samples were collected and apparent soil electrical conductivity was measured (ECa) in an experimental area of 175 hectares, on a sampling grid of 100 x 100 m. The yield data were collected in the years of 2009, 2010, 2011 and 2013 by a grain harvester equipped with yield monitoring system. Yield data for each field were filtered to remove outliers. The yield data for all the years, the soil properties, the digital elevation model (DEM) and the soil apparent electrical conductivity for a regular grid of 9.94 x 9.35 were estimated by kriging. The spatial and temporal yield trend map may help to delimit management zones, since it may identify areas that have low and unstable yield over time. The spatial trend and yield temporal stability map, ECa and the DEM were considered reasonable attributes to determine management zones, as it correlated with several soil properties of agronomic importance.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A adoção da agricultura de precisão vem crescendo em relação ao uso dos sistemas de cultivo convencionais. As principais razões da adoção da agricultura de precisão fundamentam-se na necessidade de reduzir os custos e de melhorar a eficiência dos sistemas de produção, o que atualmente utilizando a mecanização agrícola, que disponibiliza uma série de equipamentos e de técnicas para o manejo em sítios específicos.

Ao praticar a agricultura de precisão, é possível identificar áreas que têm potencial para atingir maior lucratividade. A adoção desta técnica tem o objetivo de identificar, analisar e gerenciar a variabilidade espacial e temporal de fatores que determinam a produtividade das culturas dentro dos talhões, a fim de aumentar a rentabilidade e buscar redução do impacto ambiental (DUFFERA et al., 2007; SINGH et al., 2011; VALENTE et al., 2012b).

A utilização da agricultura de precisão, que tem como um dos pilares a análise da variabilidade de atributos do solo, requer, na maioria dos sistemas agrícolas, amostragem densa e o estabelecimento de regras de manejo para aplicar tratamentos diferenciados (KÜHN et al., 2009). A diminuição da densidade de amostragem pode levar a erros na estimativa da variabilidade espacial de nutrientes do solo e, conseqüentemente, a erros na recomendação (VALENTE et al., 2012b). A interpretação dos dados na análise da variabilidade espacial e temporal de atributos do solo e produtividade das culturas vem sendo considerada uma das maiores limitações na consolidação da agricultura de precisão no Brasil.

Uma técnica para reduzir o número de amostras é definir zonas de manejo (FRIDGEN et al., 2004; DUFFERA et al., 2007; ZHANG et al., 2009; MORAL et al., 2010; VALENTE et al., 2012a; ALVES et al., 2013). Elas podem direcionar o plano de amostragem do solo, fornecer informações fundamentais para o manejo do solo, além de representar áreas com mesmo potencial de produção (LI et al., 2007). A informação de campo, frequentemente utilizada para a definição de zonas de manejo, tem por base o modelo digital de elevação, mapas de atributos do solo que foram gerados por amostragem sistemática no campo e mapas de produtividade obtidos em vários anos (VALENTE et al., 2012b).

Os mapas de produtividade de vários anos podem proporcionar um melhor entendimento e determinar o potencial produtivo definido pelas zonas de manejo

(DIKER et al., 2004; BRUS e HEUVELINK, 2007). Comparações de variações espaciais e temporais de produtividade são importantes e atrativas porque são diretas e quantitativas (JAYNES et al., 2005; DUFFERA et al., 2007). Essa abordagem considera que se os padrões espaciais de produtividade forem semelhantes ao longo do tempo em uma determinada área, então essa área pode ser considerada uma zona de manejo.

A utilização de dados de produtividade para identificar regiões dentro de uma área onde as culturas respondam de forma semelhante, ao longo dos anos, tem sido feita por vários pesquisadores (BLACKMORE, 2000; BLACKMORE et al., 2003; KASPAR et al., 2003; DIKER et al., 2004; JAYNES et al., 2005; MARQUES DA SILVA, 2006; FLORIN et al., 2009; GUEDES FILHO et al., 2010; MCKINION et al., 2010; GRIFO e SILVA, 2013; SANTI et al., 2013). Jaynes et al. (2003) utilizaram a estatística multivariada para decifrar os padrões de variabilidade temporal e espacial da produtividade do milho em um período de seis anos e verificaram que o agrupamento de dados de produtividade de vários anos pode ser um método eficaz para determinar zonas de manejo. De Iaco et al. (2003) contribuíram para a modelagem espaço-temporal, utilizando o modelo linear de co-regionalização em um contexto espaço-temporal multivariado. Diker et al. (2004) desenvolveram uma metodologia para delimitar zonas de resposta da produtividade por meio da análise de frequência da produtividade. A variabilidade espacial e temporal da produtividade pode ser usada para discriminar o atributo do solo que mais influencia a produtividade de uma lavoura, pois é o resultado da interação entre os atributos do solo, as variáveis associadas ao clima, às plantas e aos insumos utilizados na produção.

O conhecimento quantitativo dos fatores e interações que afetam a produtividade é essencial para o manejo localizado do solo, e um dos fatores que afeta a produtividade é a topografia. Dependendo da sua condição pode ocasionar maior perda de nutrientes por lixiviação e erosão (KUMHÁLOVÁ et al., 2011). Além disso, a topografia da área define a quantidade de energia solar incidente durante o desenvolvimento da cultura, impactando na produtividade e na qualidade do que é produzido. Assim, a topografia pode ser considerada um parâmetro composto que reflete a influência combinada de vários fatores que afetam a produtividade (MCKINION et al., 2010).

Dados topográficos combinados com informações do solo permitem explicar as causas de variação espacial da produtividade em áreas agrícolas. Além disso, há um menor custo e tempo e uma maior facilidade na obtenção dos dados de elevação do terreno do que de atributos do solo (KRAVCHENKO et al., 2000; KRAVCHENKO e BULLOCK, 2002; MARQUES DA SILVA e SILVA, 2006). A informação do terreno

pode ser utilizada para estudar as relações quantitativas entre produtividade e topografia, bem como produtividade e atributos físicos e químicos do solo em grandes escalas.

Vários estudos têm sido feitos levando em consideração os componentes topográficos do terreno. Kumhálová et al. (2011) avaliaram o impacto da topografia nos atributos do solo e na produtividade, em uma área com uma declividade média de aproximadamente 6%, e encontraram uma relação significativa entre a produtividade e a concentração de nutrientes com a topografia.

Diferentes estudos feitos por Marques da Silva (2006) e Marques da Silva e Silva (2006, 2008) sobre a variabilidade espacial e temporal da produção de milho irrigado, em declividades variando de 5 a 26 %, em diferentes áreas, constataram que ela foi um dos fatores que influenciaram fortemente na variabilidade espacial e temporal da produtividade. Vitharana et al. (2008) analisaram a topografia e os principais atributos do solo para delimitar zonas de manejo e encontraram uma variação espacial fortemente estruturada de vários atributos do solo em uma área com topografia ondulada, com declividade variando de 10 a 15 %. Estes autores também observaram que as diferenças de produtividade foram mais relacionadas às diferenças na topografia entre as classes delimitadas do que à variabilidade nos atributos do solo.

Ao avaliar os mapas de produtividade e os atributos do solo, considerando a declividade do terreno variando de 0 a 13 %, Alba et al. (2011) observaram aumento no teor de argila nas cotas mais baixas do terreno, tendo sido o teor de potássio e a produtividade influenciados pelo relevo. Kitchen et al. (2005) delimitaram zonas de manejo, com base em dados de condutividade elétrica, em campos com declividade média de 0,7 a 1,8 %, e obtiveram melhores resultados quando incluíram um modelo digital de elevação.

Dados de elevação retirados de colhedoras equipadas com monitores de produtividade são precisos e estão se tornando mais acessíveis, permitindo a geração de modelos digitais de elevação (KUMHÁLOVÁ et al., 2011). Dados topográficos em combinação com outras informações de manejo da cultura podem ser muito úteis para explicar a variabilidade espacial e temporal da produtividade em uma área (MARQUES DA SILVA e SILVA, 2006).

Outra fonte amplamente utilizada na delimitação de zonas de manejo é a medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), seja por indução eletromagnética ou medições de resistividade elétrica. As variações da CEa ocorrem com as alterações dos atributos do solo, tais como, quantidade de água, argila, matéria

orgânica, capacidade de troca de cátions, temperatura e da elevação do terreno (CORWIN e LESCH, 2005; DOOLITTLE e BREVIK, 2014). Esses são atributos muito importantes para o manejo do solo, tendo a CEa sido utilizada com frequência para delimitar zonas de manejo (CORWIN e LESCH, 2003; CORWIN et al., 2003; CORWIN e LESCH, 2005; KITCHEN et al., 2005; LI et al., 2008; MOLIN e CASTRO, 2008; MORAL et al., 2010; VALENTE et al., 2012a; ALVES et al., 2013; SCUDIERO et al., 2013; COSTA et al., 2014). Os sistemas de medição de CEa, em conjunto com Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS), são capazes de produzir um grande número de dados georreferenciados num curto período de tempo, sendo relativamente baratos e confiáveis (VITHARANA et al., 2008; VALENTE et al., 2012b).

Quando os produtores recebem grande quantidade de dados, esses devem ser analisados cuidadosamente, e as decisões sobre como o manejo a sítio específico deve ser realizado precisam ser tomadas. Esta etapa ainda é muito crítica em grandes produções agrícolas. No entanto, algoritmos de classificação não supervisionada são muitas vezes utilizados para dividir a área em zonas, pois é normalmente assumido que os usuários podem não ter, *a priori*, conhecimento de quais informações devem ser usadas para a classificação (ZHANG et al., 2009).

As áreas de produção, geralmente, estão sujeitas a um elevado nível tecnológico, o que leva a crer que as variabilidades espaciais e temporais desse tipo de produção dependem com maior intensidade de fatores relativamente estáveis. Dentre esses fatores estão alguns atributos do solo. Se isso for verdadeiro, para o manejo diferenciado de tais fatores, pode ser levado em conta o padrão estabelecido pela variabilidade espacial e temporal da produtividade.

As técnicas de delimitação de zonas de manejo permitem a subdivisão das áreas em regiões em que valores de produtividades mais próximas se assemelham a um determinado padrão de safra para safra, podendo estas áreas serem consideradas zonas potenciais de manejo.

1.1 Objetivos

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de analisar as variabilidades espacial e temporal de produtividade das culturas de milho e soja, em sistema de sucessão, e sua relação com os atributos do solo em uma área sob plantio direto.

Os objetivos específicos desse estudo foram:

- Avaliar os mapas de produtividade multianuais por meio da análise do padrão de variabilidade espacial e temporal;
- Avaliar a quantificação da variação temporal da produtividade pelo coeficiente de variação;
- Analisar a relação entre o mapa do padrão de variabilidade espacial e temporal da produtividade com os mapas de argila, CTC (T) e saturação por bases.
- Correlacionar os mapas do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade com os mapas de atributos físicos, químicos e físico-químicos do solo e com o modelo digital de elevação;
- Delimitar zonas de manejo com base na análise da variabilidade espacial e temporal de produtividade, mapa de condutividade elétrica aparente do solo e o modelo digital de elevação; e
- Validar as zonas de manejo delimitadas, analisando a variabilidade dos atributos físicos, químicos e físico-químicos do solo no interior de cada zona.

1.2 Justificativa

A utilização das técnicas de agricultura de precisão gera um volume grande de informações, levando ao questionamento de como interpretá-las e usá-las na condição de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão, frente à variabilidade espacial existente nas áreas agrícolas. No entanto, a interpretação destes dados, de forma rápida, vem sendo considerada um dos entraves na consolidação deste sistema no Brasil.

Mapas de produtividade contêm uma riqueza de informações e desempenham um papel importante no processo de tomada de decisão para os agricultores. Muitos agricultores possuem mapas de produtividade que abrangem uma série de anos e, apesar de despertar interesse, a maioria dos usuários não sabem como interpretar e fazer uso destes mapas.

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é sensível à variabilidade de atributos que determinam a capacidade do solo em conduzir corrente elétrica, sendo muitos desses atributos importantes para o manejo das culturas. O potencial de utilização da CEa apresenta baixo custo de aquisição dos dados, elevada capacidade

operacional dos equipamentos de medição e associação a vários atributos de importância agrônômica.

O volume de dados gerados pela fácil aquisição de dados de produtividade e condutividade elétrica e a dificuldade de se realizar a análise eficiente desses dados têm desestimulado a utilização desses dados para a prática de agricultura de precisão. Contudo, a delimitação de zonas de manejo utilizando dados de fácil aquisição e relativamente de baixo custo, como mapas de produtividade, condutividade elétrica aparente do solo e modelo digital de elevação, pode reduzir os custos de produção e o impacto ambiental provocado pelas práticas agrícolas. A região de cerrado representa um centro de produção agrícola que vem utilizando essas ferramentas de aquisição de dados e possui solos com características peculiares, sendo necessários estudos que facilitem a interpretação dessas informações.

Entretanto, é preciso compreender melhor essas ferramentas para estabelecer uma aplicabilidade da informação por elas obtida. Esse trabalho procura contribuir com as pesquisas sobre variabilidade espacial e temporal dos mapas de produtividade e condutividade elétrica aparente do solo na região de cerrado, para que se possa desenvolver ferramentas que facilitem a interpretação do volume de dados gerados pela técnica de agricultura de precisão.

1.3 Escopo do trabalho

A organização desse trabalho consiste da introdução geral, dos objetivos e justificativa do trabalho, de dois capítulos no formato de artigos científicos, da conclusão geral e do apêndice. Os itens introdução geral, objetivos e justificativa já foram abordados com o intuito de apresentar o tema de estudo e informações necessárias para melhor entendimento do trabalho.

O primeiro capítulo consiste na análise do padrão de variabilidade espacial e temporal dos mapas de produtividade de quatro anos, produzidos em sistemas de plantio direto. Neste artigo, propõe-se estudar o padrão espacial e temporal da produtividade e dos atributos do solo e delimitar zonas de manejo relacionando os padrões da produtividade com os atributos de solo.

O segundo capítulo estuda o relacionamento dos padrões espacial e temporal da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), o modelo digital de elevação (MDE) com a produtividade de em sistema de plantio direto. Isso é feito com a intenção de gerar

zonas de manejo levando em conta o índice de concordância entre os padrões espaciais dos atributos analisados.

O item conclusão geral aborda os principais resultados dos dois artigos, resumindo-os com enfoque nos objetivos inicialmente propostos. O último item é o apêndice, onde são apresentados os semivariogramas experimentais.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, P. J.; AMADO, T. J. C.; GIOTTO, E.; SCHOSSLER, D.; FIORIN, J. E. Agricultura de precisão: mapas de rendimento e de atributos de solo analisados em três dimensões. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 13, p. 29-41, 2011.

ALVES, S. M. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, n. 1, p. 37-51, 2000.

BLACKMORE, S.; GODWIN, R. J.; FOUNTAS, S. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 455-466, 2003.

BRUS, D. J.; HEUVELINK, G. B. M. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. **Geoderma**, v. 138, n. 1-2, p. 86-95, 2007.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **American Society of Agronomy**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; SOPPE, R.; AYARS, J. E. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003.

COSTA, M. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; REIS, E. F.; SANTOS, N. T. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395-401, 2014.

DE IACO, S.; MYERS, D. E.; POSA, D. The Linear Coregionalization Model and the Product – Sum Space –Time Variogram. **Mathematical Geology**, v. 35, n. 1, 2003.

DIKER, K.; HEERMANN, D. F.; BRODAHL, M. K. Frequency Analysis of Yield for

- Delineating Yield Response Zones. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 5, p. 435-444, 2004.
- DOOLITTLE, J. A.; BREVIK, E. C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. **Geoderma**, v. 223–225, n. 0, p. 33-45, 2014.
- DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, v. 137, n. 3-4, p. 327-339, 2007.
- FLORIN, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. **European Journal of Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 212-219, 2009.
- FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.
- GRIFO, A.; SILVA, J. M. Análise espacial e temporal da produção de milho. **Revista da Unidade de Investigação do Instituto Politécnico de Santarém**, v. 2, p. 48-65, 2013.
- GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; NAGUMO, C. H.; DECHEN, S. C. F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1-14, 2010.
- JAYNES, D. B.; COLVIN, T. S.; KASPAR, T. C. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 309-327, 2005.
- JAYNES, D. B.; KASPAR, T. C.; COLVIN, T. S.; JAMES, D. E. Cluster Analysis of Spatiotemporal Corn Yield Patterns in an Iowa Field. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 574-586, 2003/5 2003.
- KASPAR, T. C.; COLVIN, T. S.; JAYNES, D. B.; KARLEN, D. L.; JAMES, D. E.; MEEK, D. W.; PULIDO, D.; BUTLER, H. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 87-101, 2003.
- KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 285-308, 2005.
- KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Spatial Variability of Soybean Quality Data as a Function of Field Topography. **Crop Science**, v. 42, n. 3, p. 804-815, 2002/5 2002.
- KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G.; BOAST, C. W. Joint Multifractal Analysis of Crop Yield and Terrain Slope. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 6, p. 1279-1290, 2000/11 2000.

KÜHN, J.; BRENNING, A.; WEHRHAN, M.; KOSZINSKI, S.; SOMMER, M. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 490-507, 2009.

KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, Š. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**, 2011.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 174-186, 2007.

LI, Y.; SHI, Z.; WU, C. F.; LI, H. Y.; LI, F. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University SCIENCE B**, v. 9, n. 1, p. 68-76, Jan 2008.

MARQUES DA SILVA, J. R. Analysis of the Spatial and Temporal Variability of Irrigated Maize Yield. **Biosystems Engineering**, v. 94, n. 3, p. 337-349, 2006.

MARQUES DA SILVA, J. R.; SILVA, L. L. Evaluation of Maize Yield Spatial Variability based on Field Flow Density. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 3, p. 339-347, 2006.

MARQUES DA SILVA, J. R.; SILVA, L. L. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 2, p. 183-190, 2008.

MCKINION, J. M.; WILLERS, J. L.; JENKINS, J. N. Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 187-198, 2010.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. D. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 567-573, 2008.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, R. F.; ROS, C. O. D. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; CORWIN, D. L.; DEIANA, R.; BERTI, A.; MORARI, F. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 54-64, 2013.

SINGH, P. K.; PARRY, F. A.; PARVEEN, K.; NARAYAN, S.; AMIN, A.; VAIDYA, A. Precision farming and its role in vegetable production. **International Journal of Current Research**, v. 3, n. 4, p. 74-81, 2011.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, p. 173-179, 2012a.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 683-690, 2012b.

VITHARANA, U. W. A.; VAN MEIRVENNE, M.; SIMPSON, D.; COCKX, L.; DE BAERDEMAEKER, J. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. **Geoderma**, v. 143, n. 1-2, p. 206-215, 2008.

ZHANG, X.; SHI, L.; JIA, X.; SEIELSTAD, G.; HELGASON, C. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 103-114, 2009.

3 CAPÍTULO I – PADRÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS MAPAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO E SOJA PRODUZIDOS NO CERRADO

3.1 RESUMO

A utilização de mapas de produtividade de vários anos pode ser uma ferramenta útil para explicar e caracterizar a variabilidade produtiva das culturas, além de definir zonas com distintos potenciais produtivos. Este trabalho tem como objetivo identificar os padrões espaciais e temporais para delimitação de zonas de manejo, por meio de uma análise quantitativa dos mapas de produtividade de quatro safras de milho e soja produzidos no Cerrado. O presente trabalho foi desenvolvido na região de Gameleira de Goiás, GO em uma área de 175 ha com quatro safras de milho e soja. Foram coletadas amostras de solo, em uma malha amostral de 100 m x 100 m para obtenção dos valores de CTC (capacidade de troca catiônica), saturação por bases (V) e teor de argila. Para caracterizar a variabilidade espacial da produtividade primeiro foi realizada a análise geoestatística e interpolação dos dados de produtividade de cada ano, depois para determinar as áreas com altas e baixas produtividades, de todos os anos foi realizada a média de produtividade dentre os anos estudados. Áreas estáveis e instáveis foram determinadas pela quantificação da variação temporal da produtividade obtida pelo coeficiente de variação, em um mesmo local ao longo dos anos. Para obtenção do mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade foi feita a classificação da produtividade a partir da quantificação espacial e temporal da produtividade em quatro classes: alta e estável (AE); alta e instável (AI); baixa e estável (BE) e baixa e instável (BI). O grau de relacionamento entre o mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade e os valores de CTC (T), V e teor de argila foram determinados pelo teste Qui-quadrado. Verificou-se que não existe relação entre os mapas de teor de argila, CTC (T) e V e o mapa do padrão de variabilidade espacial e temporal da produtividade.

Palavras-chave: Zonas de Manejo, Agricultura de Precisão, Variabilidade Espacial e Temporal de Produtividade.

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERN YIELD MAP OF CORN AND SOYBEAN PRODUCED IN CERRADO REGION

3.2 ABSTRACT

The use of multi-year yield maps can be a useful tool to explain and characterize the variability of crop production, as well as defining areas with same yield potential. The objective of this work was to identify the spatial and temporal yield variability trends to define management zones, through a quantitative analysis of the corn and soybeans yield maps in a farm of the Cerrado region. This work was developed in region Gameleira of Goiás, GO in an area of 175 ha with four harvests of corn and soybeans. Soil samples were collected on a sampling grid of 100 m x 100 m to obtain the values CEC (cation exchange capacity), base saturation (V) and clay content. The quantification of the spatial variability of yield maps was firstly made geostatistical analysis and interpolation of each year yield data, then to determine the areas with high and low yield of every year was held the average yield from the years studied. Stable and unstable areas were determined by quantifying the temporal variation of the yield obtained by the variation coefficient in the same location over the years. The map of the spatial and temporal variability classification of yield was obtained linking the spatial and temporal quantification in the yield into four classes: high and stable (AE); high and unstable (AI); low and stable (BE) and low and unstable (BI). The level of relationship between the the spatial and temporal variability of yield map and cation exchange capacity, base saturation and clay content maps were made using the chi-square test. The map of spatial and temporal trend allowed the management zone definition. It was found that there is no relationship between of maps the clay content, CTC (T) and V and the map of the pattern of spatial and temporal variability of yield.

Key Words: Management zones, precision agriculture, spatial and temporal yield variability

3.3 INTRODUÇÃO

A racionalização e a modernização da agricultura são fatores importantes para o aumento da eficiência dos sistemas de produção. A necessidade de considerar a variabilidade espacial e temporal e a adoção de técnicas de cultivos adequadas na

produção das culturas anuais é decorrente do aumento dos custos dos insumos agrícolas e da necessidade que o mundo tem em produzir mais alimentos utilizando menos insumos. Desta forma, a agricultura de precisão surge como uma ferramenta importante no gerenciamento da variação espacial e temporal das culturas, buscando redução da quantidade de insumos a serem aplicados com o intuito de gerar benefícios econômicos e ambientais (TAYLOR et al., 2003; MILANI et al., 2006; DALCHIAVON et al., 2011).

A agricultura de precisão é um método de manejo em que os insumos são aplicados em dosagens variáveis de acordo com as características e necessidades de cada ponto da área (SUSZEK et al., 2011). A adoção das técnicas de agricultura de precisão gera um volume grande de informações. Isso dificulta o processo de interpretação e a sua utilização para a tomada de decisão (MILANI et al., 2006).

O uso de mapas de produtividade de vários anos para a definição e consolidação de zonas com distintos potenciais produtivos parece ser a maneira mais eficiente para caracterizar e explicar a variabilidade produtiva das culturas (MILANI et al., 2006; SANTI, 2007; SUSZEK et al., 2011; SANTI et al., 2013). Os mapas de produtividade, mensurados por meio de sensores instalados em colhedoras, contêm uma riqueza de informações pois representam a resposta das plantas às condições de cultivo a que estão submetidas. Estas informações, por outro lado, devem servir de base para intervenções localizadas, ou seja, em sítios específicos (GODWIN et al., 2003; ROBINSON e METTERNICHT, 2005; MCKINION et al., 2010; BOTTEGA et al., 2013; SANTI et al., 2013). Entretanto, muitos agricultores têm, em mãos, mapas de produtividade que cobrem uma série de anos, com muitas informações e, apesar de despertarem muito interesse, não sabem como interpretar e fazer uso deles (BLACKMORE, 2000).

A caracterização da variabilidade na produtividade deve ser feita considerando a análise de, pelo menos, três anos de mapeamento, para que a tomada de decisão referente ao manejo a ser empregado possa ser feita de forma precisa e eficaz (SANTI, 2007; SANTI et al., 2013). A comparação entre mapas de produtividade para diferentes anos é uma etapa importante no processo de identificação de zonas de manejo (MILANI et al., 2006). No entanto, para esta comparação, deve-se levar em conta a variabilidade espacial e temporal da produtividade.

O reconhecimento de padrões por análise de agrupamento multivariado é proposto como uma ferramenta para interpretar a variação espacial e temporal da produtividade das culturas. Estudos mostraram que alguns padrões gerais de variação de ano a ano poderiam ser identificados (LARK e STAFFORD, 1997; BLACKMORE,

2000; AMADO et al., 2007; BOTTEGA et al., 2013; SANTI et al., 2013).

A técnica de análise de agrupamentos pode reduzir a quantidade necessária de mapas até se observar regularização nas zonas de produtividade, a utilização da sequência temporal de no mínimo três mapas de produtividade proporcionam delimitação de zonas com distintos potenciais produtivos (SANTI et al., 2013).

Os fatores de produção, geralmente, estão sujeitos a um elevado nível tecnológico, o que leva a crer que as variabilidades espaciais e temporais desse tipo de produção dependem de fatores relativamente estáveis. Dentre esses fatores estão alguns atributos do solo. Se isso for verdadeiro, para o manejo diferenciado de tais fatores, pode ser levado em conta o padrão estabelecido pela variabilidade espacial e temporal da produtividade.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo identificar os padrões espaciais e temporais para delimitação de zonas de manejo por meio de análise quantitativa dos mapas de produtividade, sob sistema de plantio direto e avaliar a relação com atributos do solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um talhão de 175 hectares, na fazenda Novo Horizonte, localizada no município de Gameleira de Goiás, GO, com altitude média de 1040 m, longitude 48° 42' O e latitude 16° 22' S. O solo predominante da área é o Latossolo Vermelho com textura média, com declividade variando de 1 a 5 %.

Para sistematização da área foi utilizada uma grade amostral regular de 100 x 100 m, totalizando 175 pontos. Em cada ponto do grid amostral, foram coletadas amostras de solo para determinação dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K, Na, H^+ e Al^{3+} foram calculados os seguintes atributos de fertilidade: CTC a pH 7 (capacidade de troca catiônica) e V (saturação por bases). Foi também determinado para cada um dos pontos de amostragem a fração de argila presente no solo. As análises de solo foram realizadas segundo metodologias propostas pela EMBRAPA (2011). Para a geração dos mapas de contorno dos atributos do solo, foi realizada análise geoestatística utilizando uma malha amostral de 9,94 m x 9,35 m. Essa malha foi utilizada devido a compatibilidade de software.

O monitoramento da produtividade das culturas do milho e soja foi realizado com auxílio de uma colhedora John Deere®, modelo STS 9650, com receptor GNSS

(Sistema Global de Navegação por Satélites) com correção diferencial em tempo real, via satélite Omni Star, equipada com sistema de monitoramento da produtividade “Green Star” (John Deere®). Os dados regionalizados de produtividade utilizados nesse trabalho foram obtidos nas safras 2008-2009 (MP2009) com milho, 2009-2010 (MP2010) com soja, 2010-2011 (MP2011) com milho, e 2012-2013 (MP2013) com soja. Os dados da safra de 2011-2012 não foram utilizados por que o monitor de produtividade da colhedora não foi calibrado. Esses dados de produtividade foram padronizados no teor de água de 13 % para a soja e 15 % para o milho, em base úmida.

Os dados de produtividade foram filtrados para retirada dos valores discrepantes (*outliers*) bem como pontos com problemas de localização. Os valores considerados discrepantes foram as produtividades nulas e os valores menores que a média menos 2,5 vezes o desvio padrão da produtividade e maiores que a média mais 2,5 vezes o desvio padrão (JUERSCHIK e GIEBEL, 1999; FLORIN et al., 2009). A análise de normalidade dos dados foi realizada com o intuito de avaliar a distribuição dos dados após a retirada dos valores discrepantes.

A obtenção dos valores de produtividade para uma grade amostral regular de 9,94 m x 9,35 m, com área da célula de 93 m², para todos os anos, foi realizada a análise geoestatística dos dados regionalizados obtidos pela colhedora. Cada conjunto de dados foi interpolado utilizando a mesma grade regular de pontos. Esta padronização garante que todos os mapas gerados tenham o mesmo número de pixels e possam ser sobrepostos. Com isso, foi possível estimar a produtividade em cada ponto da malha para os diferentes anos, como é necessário para se aplicar a técnica de análise de agrupamentos.

Após a obtenção dos mapas com o mesmo número de pixels, foi feita a análise exploratória dos dados, para verificar a distribuição estatística dos dados de produtividade. Estes dados foram analisados por meio das medidas de posição e dispersão, assimetria e curtose. Para interpretação do coeficiente de variação (CV) foram utilizados os limites propostos por Warrick e Nielsen (1980), considerados baixo ($CV < 12\%$), médio ($12 < CV < 62\%$) e elevado ($CV > 62\%$).

A análise de tendência espacial da produtividade de cada ponto da área não pode ser feita pela média aritmética dos valores de produtividade obtido nos diferentes anos (BLACKMORE, 2000), pois existem diferentes culturas. Assim, primeiramente, os dados foram normalizados para obter os mapas com a mesma faixa de variação podendo, então, serem utilizados na comparação das culturas. Os valores de produtividade normalizada foram obtidos utilizando a Equação 1 (GUEDES FILHO et

al., 2010).

$$S_{it} = \left(\frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \right) 100 \quad (1)$$

em que:

S_{it} = produtividade normalizada (%) no ponto i , na safra t ;

y_i = valor de produtividade obtida após interpolação por krigagem ($t \text{ ha}^{-1}$);

$y_{\min}$ = produtividade mínima obtida após interpolação por krigagem ($t \text{ ha}^{-1}$); e

$y_{\max}$ = produtividade máxima obtida após interpolação por krigagem ($t \text{ ha}^{-1}$).

A normalização (Equação 1) é simplesmente uma conversão dos dados originais de produtividade, não afetando seu padrão de distribuição espacial, permitindo a inclusão de diferentes culturas na mesma análise. Utilizando os mapas de produtividade normalizada de cada ano, calculou-se para cada pixel do mapa o valor médio ($\bar{s}_t$) de produtividade normalizada

O histograma e o polígono de frequência foram gerados utilizando os dados de produtividade normalizada para cada ano. O teste t, ao nível de confiança de 95%, foi utilizado para verificar se as médias de produtividade entre as safras foram diferentes. Primeiramente classificou-se a produtividade normalizada em duas classes: Produtividade alta (A) para valores acima da média geral produtividade normalizada de todas as safras e baixa (B) para média abaixo da média geral produtividade normalizada de todas as safras. No entanto, para que abrangesse cada lado da média igualmente foi estabelecido critérios arbitrários para classificação da produtividade normalizada das culturas em quatro grupos:

Produtividade alta (PA) – média acima de 75 %;

Acima da média (AM) – média acima de 50 % e abaixo de 75 %;

Abaixo da média (BM) – média acima de 25 % e abaixo de 50 %;

Produtividade baixa (PB) – média abaixo de 25 %.

A variabilidade temporal foi analisada a partir do cálculo de variância temporal da produtividade. O desvio padrão temporal (Equação 2) representou a variação da média ao longo do tempo (2009 a 2013).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=09}^{t=13} (s_{t,i} - \bar{s}_t)^2}{n}} \quad (2)$$

em que:

σ_i = desvio padrão temporal nos pontos da grade i

t = tempo entre as safras;

$s_{t,i}$ = produtividade normalizada em t anos no ponto i ; e

$\bar{s}_t$ = média da produtividade normalizada de todo o campo nos t anos;

n = número de safras estudadas.

O coeficiente de variação temporal foi calculado pela Equação 3

$$CV = \frac{\sigma_i}{\bar{s}_t} 100 \quad (3)$$

em que:

CV = coeficiente de variação temporal.

Cada ponto dentro do mapa foi classificado temporalmente, em termos de seu padrão ser estável ou instável, de acordo com o valor do seu CV (Equação 3). O mapa de coeficiente de variação (CV) temporal foi classificado em padrões de produtividade estável e de produtividade instável, definindo um limiar de CV temporal. Blackmore (2000) considerou um limiar de CV de 30%. Se um ponto apresentou $CV < 30\%$, então considerou-se que ocorreu uma pequena variação da produtividade normalizada ao longo dos. Nessa situação, considera-se que a produtividade segue um padrão estável no tempo, pois a variabilidade temporal é baixa. No entanto, se o ponto apresentar um valor elevado de coeficiente de variação temporal ($CV > 30\%$), o ponto foi considerado como tendo produtividade normalizada temporalmente instável. O CV temporal foi calculado em cada pixel do mapa utilizando os dados de produtividade normalizada dos quatro mapas. Após esta análise, confeccionou-se um mapa de estabilidade da produtividade.

No mapa do padrão da variabilidade espacial cada ponto foi classificado em produtividade normalizada alta ou baixa, se o mesmo apresentava produtividade acima ou abaixo da média, respectivamente. Partindo das duas classificações temporais e de estabilidade foi gerado um novo mapa considerando simultaneamente a tendência espacial e estabilidade temporal de cada ponto em relação a sua produtividade ao longo das safras. Nesse mapa os pontos foram classificados em quatro classes de produtividade normalizada: AE (Alta e Estável), AI (Alta e Instável), BE (Baixa e Estável) e BI (Baixa e Instável).

O mapa de padrão da variabilidade espacial e temporal de produtividade tem coordenadas geográficas que permitem a localização, em campo, das regiões que apresentaram baixa produtividade ou produtividade instável. Uma vez localizadas, é

possível fazer uma investigação mais detalhada dos possíveis motivos que levaram essas regiões a apresentarem baixa e/ou instabilidade de produtividade. Para realizar essa investigação foi feita a análise de Qui-quadrado entre o mapa de padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade e as classes dos atributos, segundo os limites propostos em Ribeiro et al. (1999), de argila (4 classes), V (5 classes) e CTC a pH 7 (4 classes). A análise foi feita a partir de 20 pontos aleatórios retirados de cada uma das quatro classes do conjunto de dados, no total de 160 valores.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3.1 é apresentada a estatística descritiva da CTC (capacidade de troca catiônica), V (saturação por bases) e argila. Utilizando critérios estabelecidos por Ribeiro et al. (1999), a CTC foi classificada como média (8,01 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Esse atributo é considerado uma característica fundamental ao manejo da fertilidade do solo, quanto maior o seu valor, mais cátions esse solo pode reter. O V indica o quão perto o estado nutricional está do potencial de fertilidade para as culturas. O solo da área em estudo como um todo foi considerado fértil e propício para o bom desenvolvimento das culturas de milho e soja, pois apresentou um valor de 73,35 %. O solo foi classificado com textura variando de média a argilosa. O teor de argila influencia na quantidade de adubação potássica e fosfatada e a dosagem de gesso a ser aplicada.

Tabela 3.1 - Estatística descritiva dos atributos CTC (T), V e argila.

<i>Variáveis</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>DP</i>	<i>Var</i>	<i>Ck.</i>	<i>Cs.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>CV (%)</i>
CTC (T) ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$)	8,01	7,80	1,51	2,28	2,95	1,26	4,54	14,38	18,84
V (%)	73,35	74,27	8,80	77,50	0,09	-0,46	48,20	93,30	12,00
Argila (%)	30,62	29,00	10,42	108,65	-0,29	0,15	8,00	55,00	34,04

CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; V – saturação por bases; Min, – mínimo; Máx, – máximo; DP – desvio padrão; Var, – variância da amostra; Cs, – coeficiente de assimetria; Ck, – coeficiente de curtose e CV – coeficiente de variação,

Os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais foram Exponencial para CTC, Gaussiano para V e argila. A Figura 3.1 apresenta os mapas de contornos obtidos para estas variáveis. A região ao sul do mapas é onde apresenta os menores valores de argila, na faixa de 17 % a 22 %.

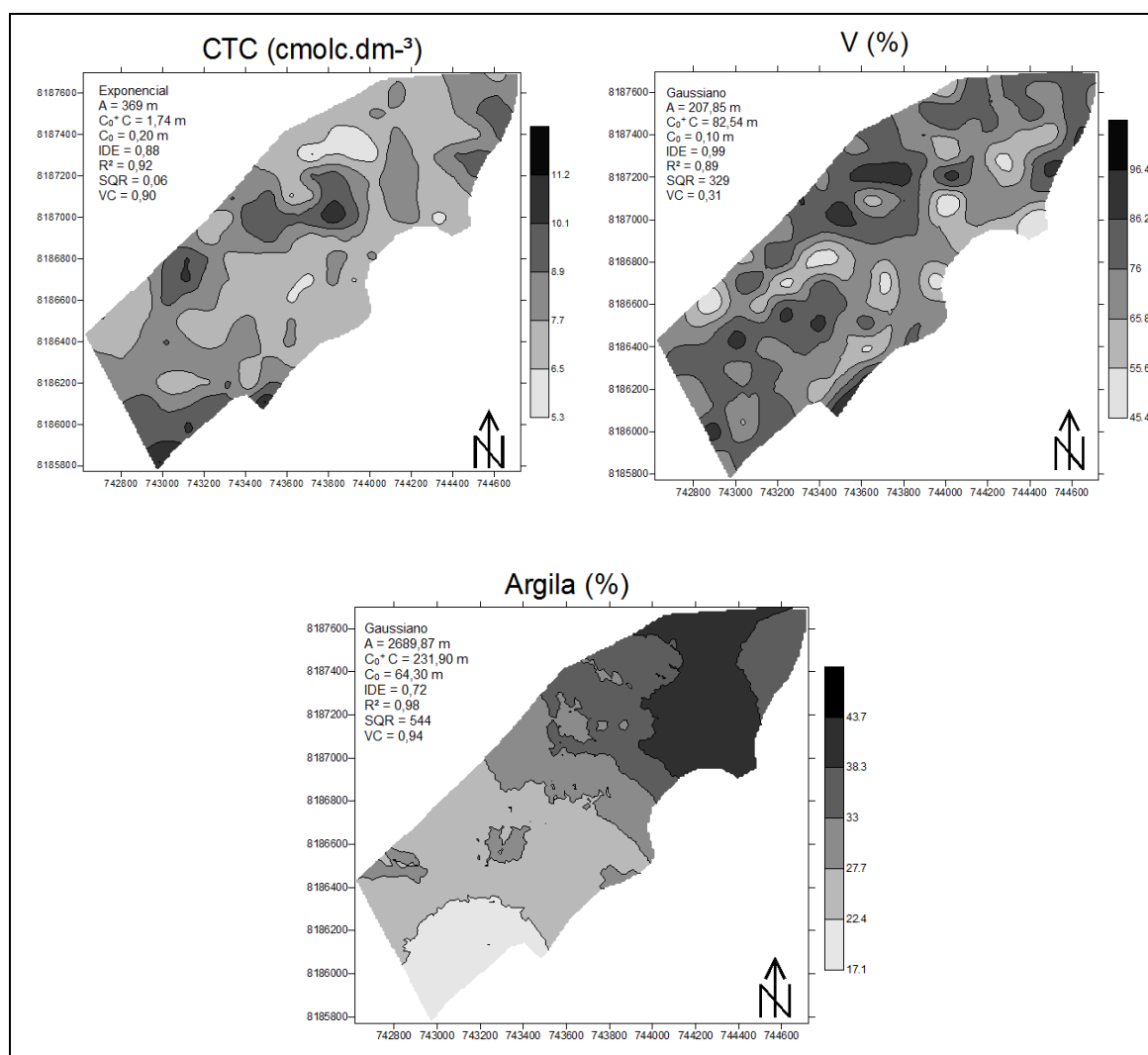


Figura 3.1 - Mapas de contorno da CTC, V e Argila. CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; V – saturação por bases; A – Alcance; C₀+C – Patamar; C₀ – Efeito pepita; IDE – Índice de Dependência Espacial, VC – coeficiente de regressão da validação cruzada; R² - coeficiente de determinação e SQR – soma dos quadrados dos resíduos.

A safra que apresentou maior número de valores discrepantes foi a MP2009 (Tabela 3.2). Os baixos valores de produtividade geralmente ocorrem quando a colhedora está entrando no talhão após a manobra, uma vez que o fluxo de grãos no interior da colhedora ainda não se estabilizou. A retrilha de material colhido em pontos já passados pela colhedora, associado à massa colhida no ponto atual, faz com que valor de produtividade no ponto sejam elevados. O processo de filtragem e extração dos pontos considerados errôneos eleva o nível qualitativo da informação contida em dados de produtividade, independente do sistema utilizado para a coleta de dados. A eliminação de pontos errôneos favorece a descrição da dependência espacial e melhora o ajuste dos modelos aos dados (MENEGATTI e MOLIN, 2004).

Tabela 3.2 - Número total de valores dos mapas de produtividade das culturas de milho e soja e seus respectivos valores discrepantes

<i>Variáveis</i>	<i>Número total de valores</i>	<i>Número de Valores discrepantes</i>	<i>Porcentagem de valores discrepantes (%)</i>
MP2009	133863	12345	9,22
MP2010	103407	6285	6,08
MP2011	146109	13027	8,91
MP2013	74586	5641	7,56

MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja.

A Figura 3.2 apresenta o histograma dos mapas de produtividade após a retirada dos dados discrepantes, de todas as safras. Todos os mapas de produtividade apresentaram distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov. O processo de filtragem dos dados atua nos pontos localizados nas extremidades da distribuição de frequência dos mapas de produtividade (MENEGATTI e MOLIN, 2004).

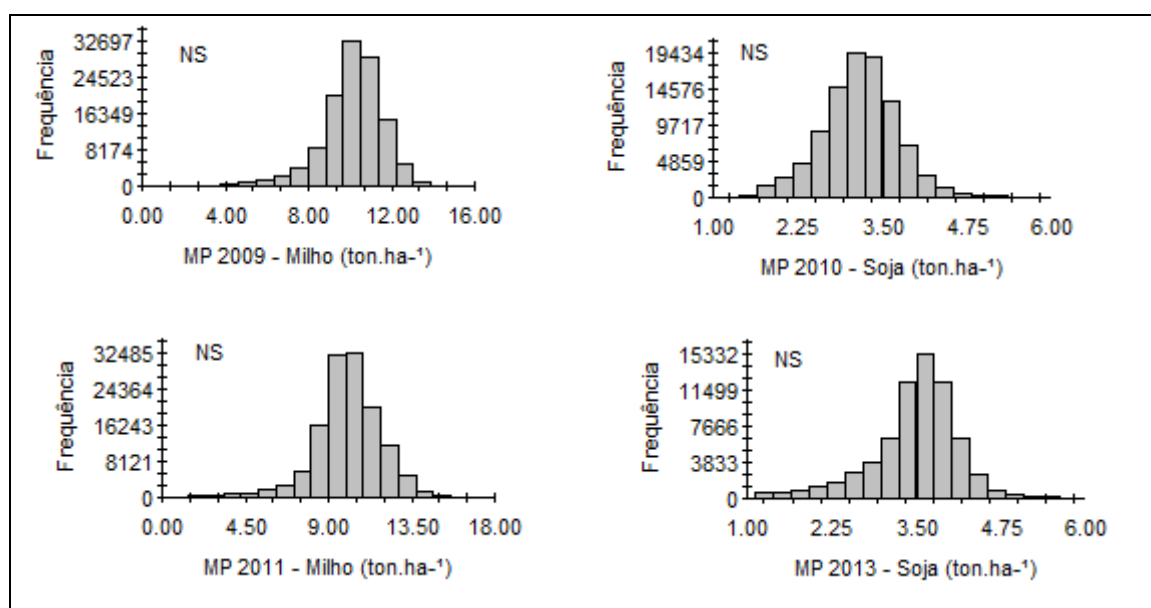


Figura 3.2 - Histograma dos mapas de produtividade após a retirada dos dados discrepantes. ^{NS} Não significativo para distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov ($p = 0,01$). MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja.

A Tabela 3.3 apresenta a estatística descritiva dos mapas de produtividades reais, em toneladas por hectare, para os anos estudados. Os MP2009, MP2010 e MP2011 apresentaram CV considerado baixo, indicando que a produtividade nessas safras tendeu a ser mais homogênea na área estudada. O coeficiente de variação para o mapa

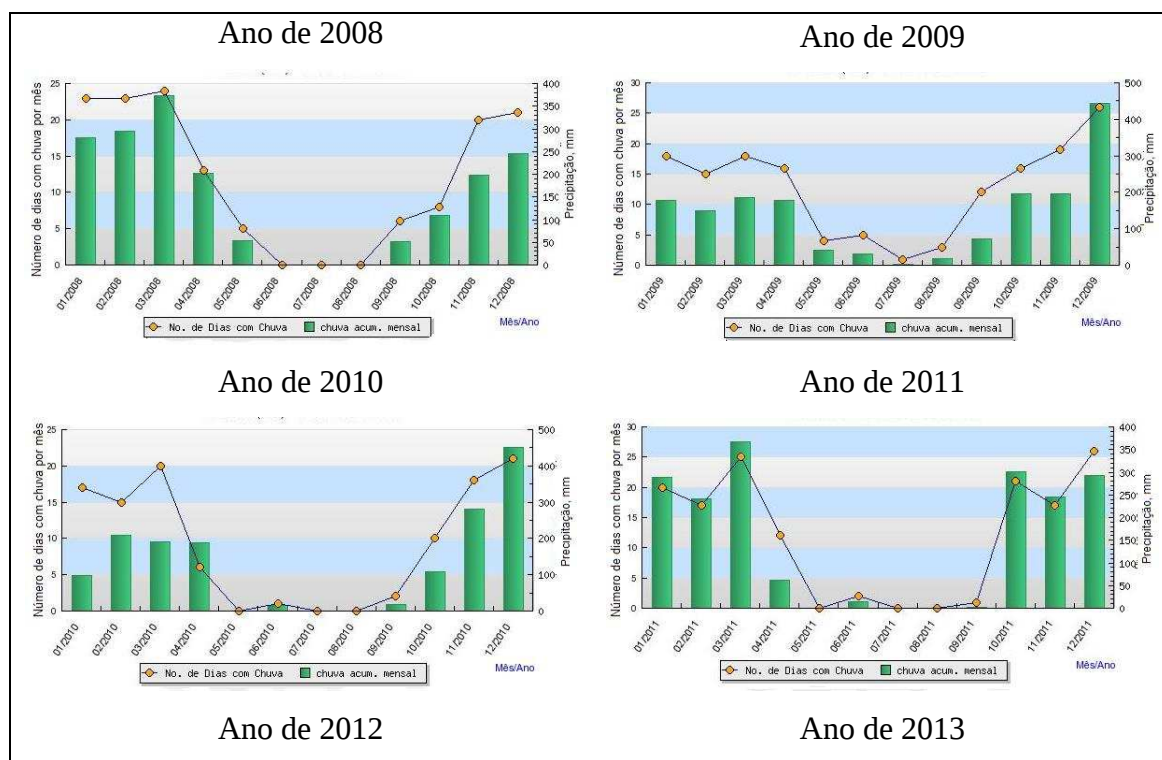
MP2013 foi considerado médio apresentando maior heterogeneidade da produtividade.

Tabela 3.3 - Estatística descritiva dos mapas de produtividades reais em t.ha⁻¹

Variáveis	Média	Mediana	DP	Var	Ck.	Cs.	Min.	Máx.	CV (%)
MP2009(t.ha ⁻¹)	10,06	10,23	1,10	1,22	1,69	-1,02	4,69	13,10	10,99
MP2010(t.ha ⁻¹)	3,18	3,19	0,37	0,13	0,46	-0,31	1,76	4,61	11,59
MP2011(t.ha ⁻¹)	10,05	10,06	0,54	0,29	0,19	-0,08	7,06	12,38	5,36
MP2013(t.ha ⁻¹)	3,33	3,48	0,59	0,35	1,45	-1,17	1,00	4,66	17,77

MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; Min, – mínimo; Máx, – máximo; DP – desvio padrão; Var, – variância da amostra; Cs, – coeficiente de assimetria; Ck, – coeficiente de curtose e CV – coeficiente de variação,

O MP2009 foi o que apresentou maior produtividade de milho. E o MP2010 apresenta uma tendência de menor produtividade de soja, isto pode ter ocorrido em função da baixa precipitação (INMET, 2015) que ocorreu no período de desenvolvimento da cultura nesse ano. Os períodos de desenvolvimento das culturas ocorrem de meados do mês de outubro a fevereiro. A Figura 3.3 apresenta a precipitação mensal, da estação de Goiânia, para os anos de desenvolvimento das culturas para as safras estudadas. Pode ocorrer períodos de chuvas concentrados em determinados dias ou veranicos, não mantendo a regularidade das chuvas, prejudicando o período de germinação das sementes e/ou desenvolvimento dos grãos.



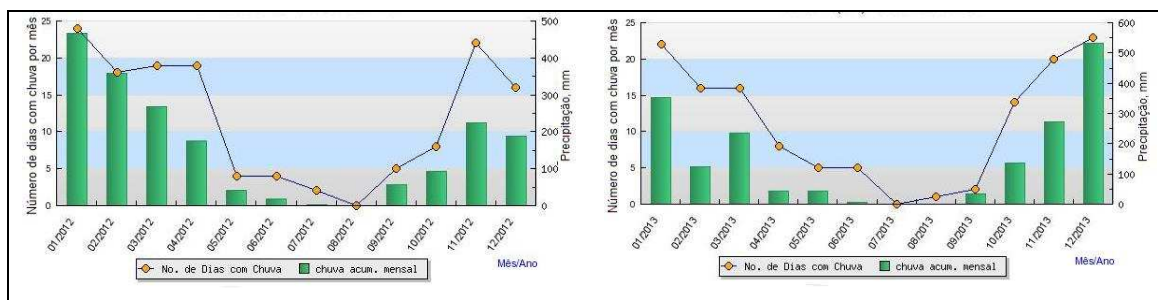


Figura 3.3 - Chuva acumulada versus número de dias com chuva, na estação de Goiânia – GO, para cada mês durante os anos de desenvolvimento das culturas para as safras estudadas. Fonte: INMET, 2015

A Figura 3.4 apresenta os mapas de produtividade normalizada para cada safra. Os mapas de produtividade apresentam a distribuição espacial da produtividade em cada uma das quatro safras. Entretanto, em todos eles, a área apresentou, de forma geral, uma produtividade acima da média. Nota-se maior frequência de alta produtividade ao centro da área no sentido de sudoeste para nordeste. E as menores produtividades foram encontradas nas bordas, principalmente na parte superior, podendo isto ocorrer por ser próxima a estrada com intenso tráfego de veículos e máquinas. Nesse local pôde também ser observado um menor desenvolvimento das culturas, podendo ter sido ocasionado por uma compactação do solo, ou pela presença de pedregulhos na região e a ausência de chuvas mesmo que por um curto período de dias pode ter ocasionado o estresse hídrico da planta, comprometendo seu desenvolvimento. Outro fator para isso ter ocorrido foi devido a algum erro experimental na determinação da produtividade pela colhedora, seja pela regulagem do sensor de posicionamento da plataforma, seja pelo tempo de resposta entre o momento em que o produto entrou na plataforma de corte da colhedora e o tempo que o fluxo de grãos é medido.

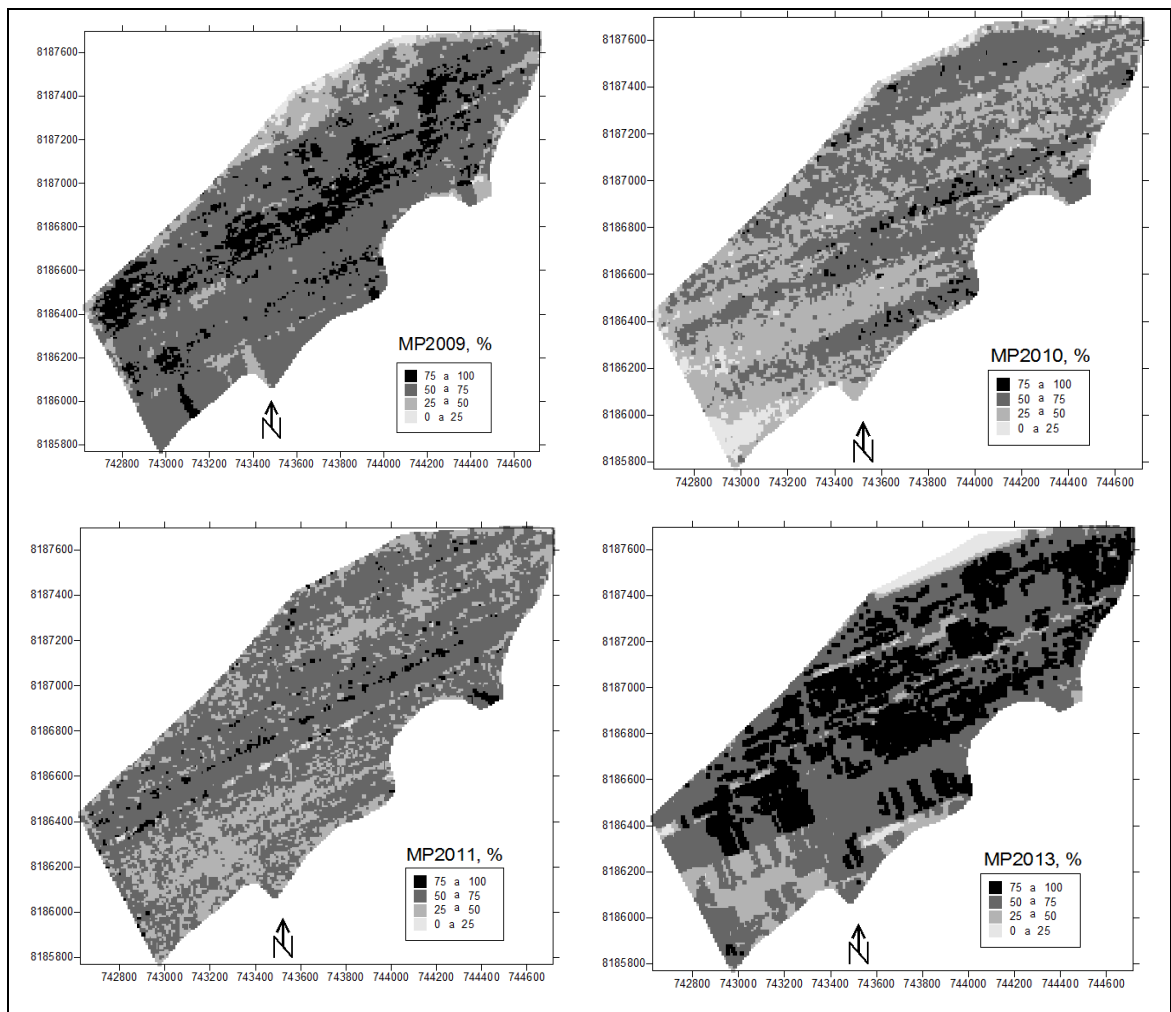


Figura 3.4- Mapa de tendência espacial da produtividade normalizada para cada ano.

Na Figura 3.5 é apresentado o polígono de frequência da produtividade normalizada para cada ano. As produtividades de todos os anos ficaram concentradas entre 50 % e 80 %. Nos mapas MP2009 e MP2013, as produtividades concentraram entre 50 % e 75 %. A distribuição dos dados de cada ano tende a uma simetria negativa, ou seja, existem alguns pontos com baixa produção.

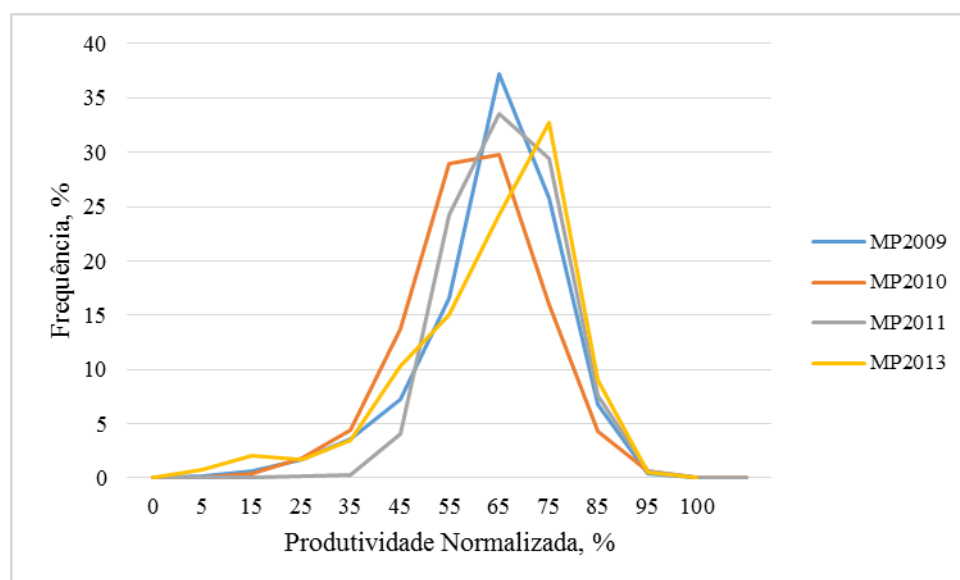


Figura 3.5 - Polígono de frequência da produtividade normalizada para as quatro safras. MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja.

O histograma dos valores da produtividade média normalizada de todos os anos vista é mostrado na Figura 3.6. Pode-se observar que distribuição da produtividade média normalizada não é simétrica apresentando maior número de pontos apresentando produtividade normalizada superior a 50 %. Houve uma tendência da produtividade normalizada estar entre 70 % e 80 %, entretanto, apesar de haver variabilidade em cada ano, a produtividade média normalizada geral dessa área é elevada (Tabela 3.4).

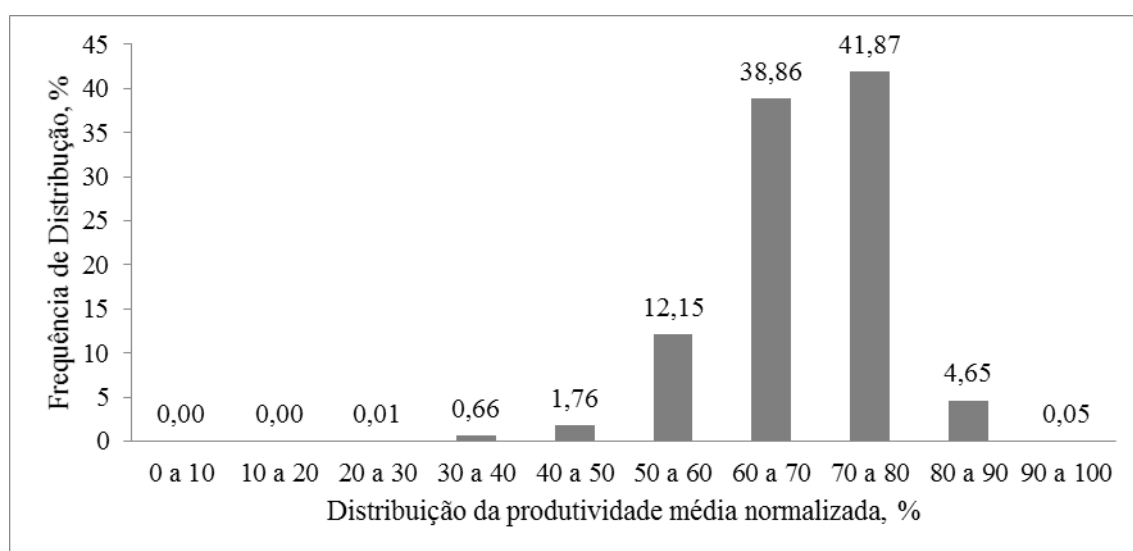


Figura 3.6 - Distribuição da produtividade média normalizada, de todos os anos

A Figura 3.7 apresenta o mapa do padrão da variabilidade espacial para produtividade média normalizada de todas as safras. Essa produtividade média

apresentaram uma amplitude de 62%, variando de 19% a 81%. Produtividades consideradas baixas (PB) foram encontradas em 0,2 % da área (0,28 ha); produtividades abaixo da média (BM) foram encontradas em 14,4 % da área (25,30 ha); em 84,8 % da área (148,85 ha), elas se encontram acima da média (AM); e em 0,6 % da área (1,12 ha), foram encontrados valores para a classe de produtividade alta (PA). No entanto, o mapa apresenta uma atenuação, evidenciando maior homogeneidade dos dados. A produtividade normalizada média da área, para as 4 safras estudadas, mostrou-se uniforme e predominância de pontos classificados como alta em 55,3% da área. Este mapa pode ser utilizado para direcionar amostragens do solo que tenham áreas consideradas homogêneas, além disso, pode-se obter informações essenciais para a tomada de decisão para aplicação de insumos e fertilizantes a taxa variada, reduzindo assim os custos de produção e os impactos ambientais.

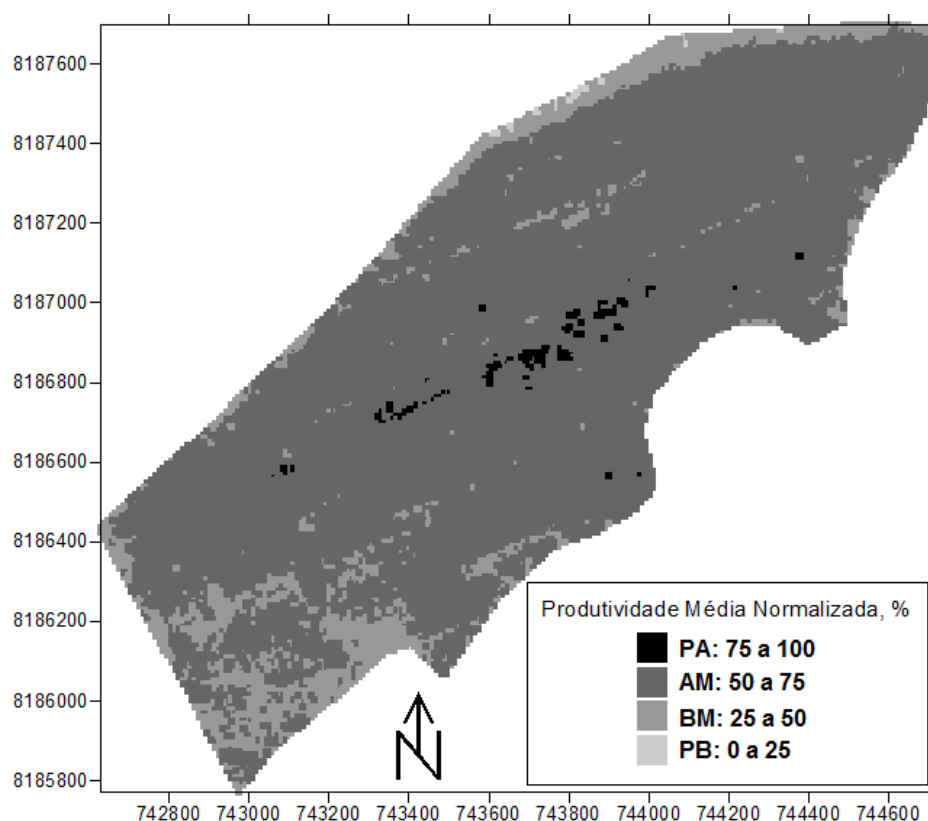


Figura 3.7 – Mapa do padrão da variabilidade espacial para produtividade média normalizada de todas as safras.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados da estatística descritiva dos dados de produtividade normalizada. Os valores de coeficiente de variação das produtividades normalizadas oscilaram entre 18 % e 26 %. Os valores obtidos de coeficiente de variação, de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), mostram que as produtividades normalizadas apresentaram variabilidade média. A maior variância

espacial dos dados de produtividade normalizada ocorreu no MP2013 e a menor no MP2011. Guedes Filho et al. (2010), ao analisarem sete anos de mapas produtividade, encontraram CV's variando de 26 % a 58,8 % e produtividades normalizadas médias variando entre 36,44 % e 54,73 % e não observaram nenhuma tendência temporal ao longo dos anos avaliados. Quando se compara os resultados obtidos a cada ano com os do mapa de tendência espacial, que representa o comportamento médio ao longo dos quatro mapas obtidos, verifica-se que o resultado do mapa de tendência espacial apresenta menor variância espacial. Isso significa que há uma certa atenuação da variabilidade espacial quando se analisa o resultado combinado de mais de uma safra.

Tabela 3.4 - Valores médios de produtividade normalizada ao longo das quatro safras.

	MP2009	MP2010	MP2011	MP2013	<i>Mapa do padrão da variabilidade espacial considerando todas as safras</i>
Produtividade Normalizada Média (%)	63,81 ^A	49,76 ^B	56,29 ^C	63,46 ^A	58,33
Variância	172,80	166,99	102,70	260,40	65,95
Desvio Padrão	13,14	12,92	10,13	16,13	8,12
CV (%)	20,60	25,97	18,00	25,43	13,92

MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja. CV – Coeficiente de variação das produtividades anuais. ^{A, B e C} / Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de t, ao nível confiança de 95%.

Analisando ainda os resultados apresentados na Tabela 3.4, nota-se que só houve igualdade de médias pelo teste t (P,0,05) entre as safras MP2009 e MP2013, sendo as demais diferenças significativas. Os valores médios para MP2009, MP2010 e MP2011 não apresentam estabilidade, uma vez que, são diferentes estatisticamente pelo teste t a 5 % de significância. Já os MP2009 e MP2013 apresentam médias iguais, evidenciando o mesmo padrão temporal.

O histograma de frequência para cada classe de CV temporal para a produtividade normalizada é apresentado na Figura 3.8. Pode-se observar no gráfico que a curva de frequência acumulada em relação ao CV temporal se estabiliza no limiar de 30 %, compreendendo aproximadamente 87,5% da área total. A partir desse ponto a inclinação dos segmentos de reta diminuem. Valores de CV acima de 30% representam instabilidade da área e correspondem a 12,5% da área total. Considerando o limiar de 30 % do CV temporal, proposto por Blackmore (2000), observa-se que 12,5 % dos pontos são considerados como área de instabilidade temporal de produtividade.

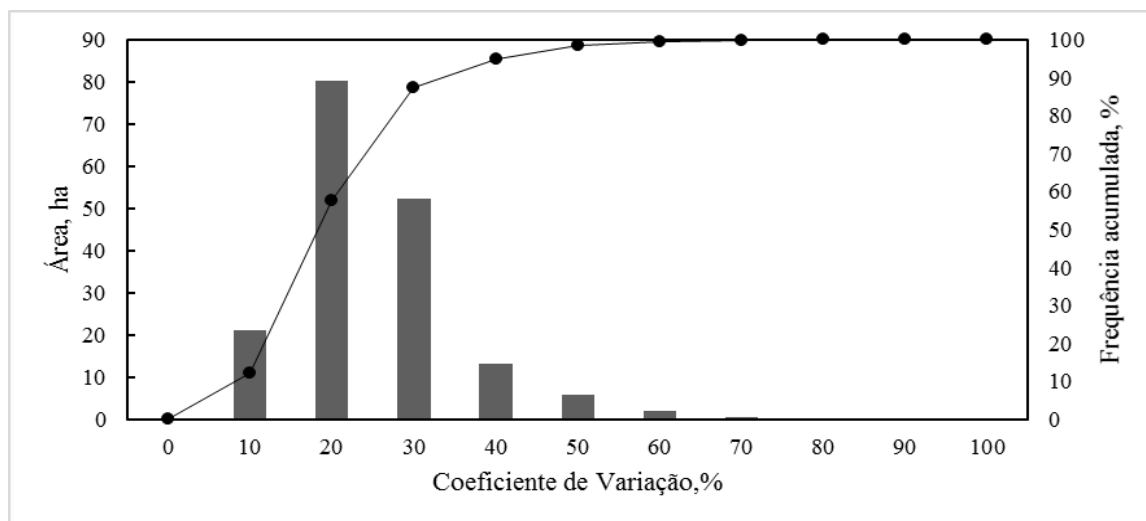


Figura 3.8 – Histograma de distribuição de frequência do CV temporal dos quatro mapas de produtividade normalizada.

Na Figura 3.9 é apresentado o mapa de estabilidade temporal da produtividade normalizada, obtido através do limiar estabelecido de 30 % do CV temporal. O mapa apresenta áreas de instabilidade temporal elevada, 21,9 ha, ou seja, 12,5% da área apresentaram alta variabilidade temporal. Essas áreas devem ser manejadas de forma diferenciada a fim de seu melhor aproveitamento, já que em termos de quantidade de área esse valor é considerado alto. As maiores variabilidades foram encontradas nas extremidades da área e na região norte e sul do mapa. Isso pode ter ocorrido devido há algum fator relacionado ao solo dessas regiões, pois essas áreas estão próximas de estradas e entradas da área onde são feitas as manobras e reposição de insumos agrícolas, devido ao acúmulo de sementes e fertilizantes, por exemplo. Além disso, esse comportamento pode estar associado a algum erro na determinação da produtividade, pois são áreas que a colheita é realizada primeiramente e ainda está realizando a calibração do sensor, ou pode ser por algum erro experimental no tempo de resposta entre o tempo em que o produto entrou na plataforma de corte da colhedora e o momento em que o fluxo de grãos é medido. Blackmore (2000) ao estudar diferentes culturas em 6 anos encontrou instabilidade em apenas 2,5 % da área e concluiu que por ser uma área muito pequena, em termos de gestão, não era necessário tratamento diferenciado. Bottega et al. (2013) ao estudar 3 anos de produtividade de soja no Cerrado encontraram instabilidade para a produtividade em 12,7% da área. Essas áreas de instabilidade podem ser manejadas distintamente das áreas consideradas estáveis. Uma vez localizado as causas de tal instabilidade é possível realizar uma análise mais detalhada dos atributos físicos e químicos do solo, incidência de plantas daninhas, doenças, entre outros fatores que levaram esta instabilidade.

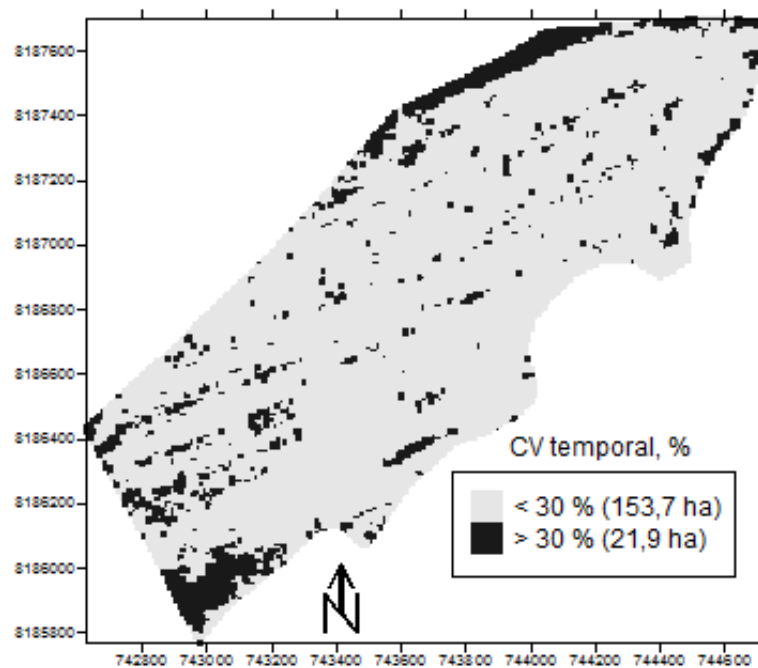


Figura 3.9 - Mapa de estabilidade temporal de produtividade

A Figura 3.10 apresenta o mapa das combinações das classes de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade, obtidas nas análises anteriores. As extremidades da área apresentaram elevado grau de instabilidade temporal e baixa produtividade, essa classificação equivale a 11,1 % da área, um total de 19,55 ha. O contrário pode ser verificado no centro da área, que apresentaram valores de produtividades normalizadas altas e estáveis, essa região é representada por 53,9 % da área (94,71 ha). Baixas produtividades estáveis também foram observadas nos cantos, principalmente na região sul do mapa, essas regiões equivalem a 33,6 % (58,98 ha) da área. O mapa mostra que os extremos norte e sul foram consistentemente de baixa produtividade. A área de baixa produtividade ao norte pode ser explicada pela existência de uma rodovia que também coincide com a entrada da fazenda, onde há intenso tráfego; além das culturas apresentarem pouco desenvolvidas devido a presença de pedregulhos que possuem baixa retenção de água e prejudica a absorção pelas plantas quando há veranicos mesmo que por poucos dias. E as baixas produtividades ao sul, pelo fato de estar sob constante tráfego de máquinas, onde são feitas as reposições dos insumos além de ser depósito de insumos utilizados na área. Outro fato que pode ter ocorrido devido a algum erro na determinação da produtividade, seja pela má regulação do sensor de posicionamento da plataforma, seja pelo tempo de resposta entre o momento que o fluxo de grãos medido e o tempo que o produto entrou na plataforma de corte da colhedora.

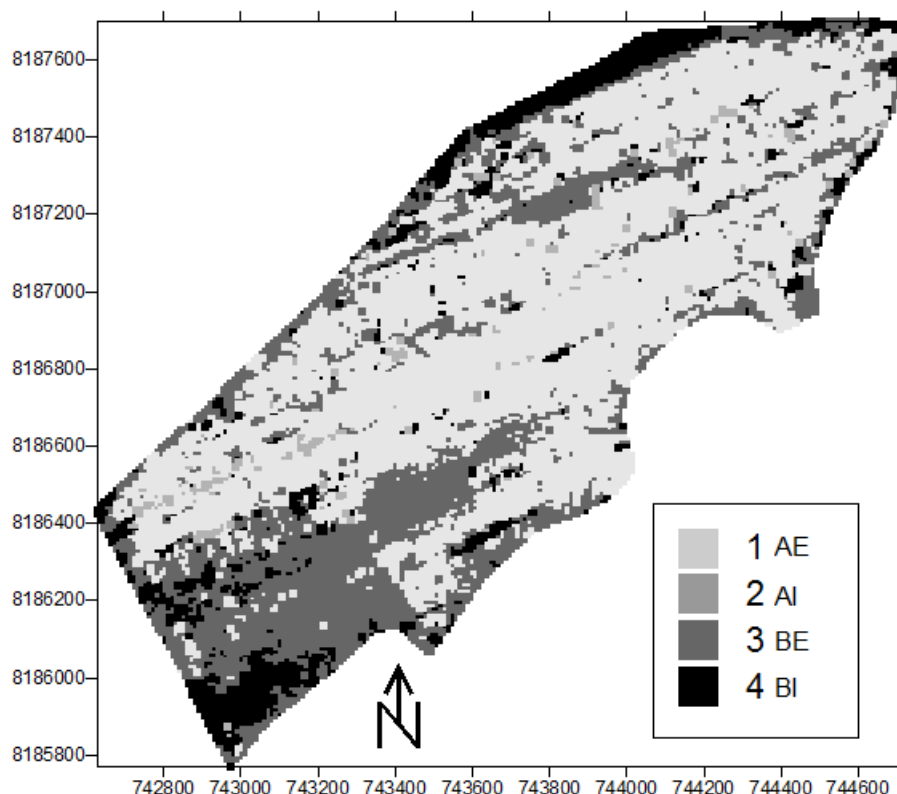


Figura 3.10 - Mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade. AE (Alta e Estável); AI (Alta e Instável); BE (Baixa e Estável); e BI (Baixa e Instável)

A Tabela 3.5 apresenta o teste Qui-quadrado entre o mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade e as classes dos atributos CTC (T), V e argila. De acordo com o teste de Qui-quadrado não foi detectada associação do mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade com nenhum dos atributos (CTC, V, argila), pois o teste de Qui-quadrado não foi significativo. Pode ser observado na Tabela 3.7, o que indica que as classes 3 e 4 possuem menor teor de argila e um maior coeficiente de variação, quando comparado com as classes 1 e 2 (produtividades alta). Guedes Filho et al. (2010) ao estudar sete safras de diferentes culturas sob plantio direto em um Latossolo verificaram uma relação espacial entre a produtividade das culturas e algumas propriedades físico-químicas do solo e que cinco safras foram suficientes para verificar zona de alta resposta da cultura.

Esse resultado indica que não há nenhuma relação entre o mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal e os atributos argila, CTC e V, indicando que há outro fator não observado que influencia a instabilidade e baixa produtividade nos limites norte e sul. Outro fator, pode ser que o mapa de produtividade de cada safra tenha uma relação significativa. Portanto, esses mapas ajudaram a identificar as características espaciais e temporais, que apesar de não apresentar nenhuma relação pode gerir a área de forma mais eficiente.

Tabela 3.5 - Teste de qui-quadrado para a associação entre as classes do mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade e as classes dos atributos CTC, V e Argila.

<i>Atributos do Solo</i>	<i>Qui-quadrado</i>
CTC (T) (cmolc.dm ⁻³)	3,81 ^{ns}
V (%)	2,64 ^{ns}
Argila (%)	1,76 ^{ns}

CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; V – saturação por bases; MAP – mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade. Obs: ^{ns} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 3.6 - Comparação dos atributos CTC, V e argila entre as classes de manejo do mapa do padrão da variabilidade espacial e temporal da produtividade

<i>Variável</i>		<i>Classe de Manejo</i>			
		1	2	3	4
CTC (T) (cmolc.dm ⁻³)	Média	7,78	7,80	8,00	8,03
	Desvio Padrão	0,84	0,73	0,94	1,04
	CV (%)	10,81	9,34	11,79	12,93
V (%)	Média	73,87	75,34	71,96	72,70
	Desvio Padrão	8,14	7,35	8,46	9,05
	CV (%)	11,01	9,76	11,75	12,45
Argila (%)	Média	32,76	30,62	27,89	28,17
	Desvio Padrão	6,09	6,11	6,74	6,41
	CV (%)	18,59	19,95	24,18	22,75

CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; V – saturação por bases;

É comum produtores realizarem a adubação corretiva de potássio total no sulco de semeadura, como ocorreu na área em estudo. Entretanto, não é recomendável aplicação de altas doses de potássio, no sulco de semeadura, pois valores baixos de CTC e solos mais arenosos podem levar a perdas de K por lixiviação (RIBEIRO et al., 1999). Valente et al. (2012) comentaram que a dosagem recomendada de fósforo para as culturas pode ser obtido em função teor de argila. O teor de argila influencia na adsorção de P, como também na quantidade de adubo fosfatado a ser aplicado, porém a correção desse nutriente pode ser feita em uma única etapa. E considerando-se, somente a influência da textura, espera-se, em razão da diferença de superfície específica entre as frações texturais, a seguinte ordem de adsorção de fosfatos: argila > silte > areia fina > areia grossa (DONAGEMMA et al., 2008). No entanto, solos com alto teor de argila podem fixar mais P do que solos arenosos pois, quanto menor o teor de argila menor poderá ser sua adsorção. O que pode ser feito na região de baixa produtividade é realizar

um manejo diferenciado na aplicação fosfatada e potássica, preferencialmente o P que apresenta baixos valores, principalmente na área com menor teor de argila.

3.6 CONCLUSÕES

- Os padrões espaciais foram identificados, encontrando-se áreas com baixas e altas produtividades.
- No padrão temporal foram encontradas áreas estáveis e instáveis
- Houve homogeneização da variabilidade espacial quando se analisou o resultado combinado de mais de uma safra.
- Foi encontrado alta instabilidade em parte da área em estudo que deve ser manejada de forma distinta.
- Não foi identificada relação entre o mapa do padrão de variabilidade espacial e temporal com os atributos do solo

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, n. 1, p. 37-51, 2000.

BOTTEGA, E. L.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja no Cerrado brasileiro. **Agrarian**, v. 6, n. 20, p. 167-177, 2013.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, p. 908-916, 2011.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ V., V. H.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1785-1791, 2008.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. In: (Ed.). 2 ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.

FLORIN, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. **European Journal of Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 212-219, 2009.

GODWIN, R.; WOOD, G. A.; TAYLOR, J. C.; KNIGHT, S. M.; WELSH, J. P. Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 375-391, 2003.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; NAGUMO, C. H.; DECHEN, S. C. F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1-14, 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Tempo - Gráficos**. Brasília, 2014. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos> >. Acesso em: Janeiro de 2015.

JUERSCHIK, P.; GIEBEL, A. Processing of point data from combine harvesters for precision farming. In: European Conference on Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 297-307, 1999.

LARK, R. M.; STAFFORD, J. V. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. **Annals of Applied Biology**, v. 130, n. 1, p. 111-121, 1997.

MCKINION, J. M.; WILLERS, J. L.; JENKINS, J. N. Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 187-198, 2010.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 126-134, 2004.

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

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

ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. **Agricultural Systems**, v. 85, n. 1, p. 19-41, 2005.

SANTI, A. L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 150p. (Doutorado em Ciência do Solo). Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, R. F.; ROS, C. O. D. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3,

p. 510-515, 2013.

SUSZEK, G.; SOUZA, E. G. D.; URIBE-OPAZO, M. A.; NOBREGA, L. H. P. Determination of management zones from normalized and standardized equivalent productivity maps in the soybean culture. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 895-905, 2011.

TAYLOR, J. C.; WOOD, G. A.; EARL, R.; GODWIN, R. J. Soil Factors and their Influence on Within-field Crop Variability, Part II: Spatial Analysis and Determination of Management Zones. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 441-453, 2003.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 683-690, 2012.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Application of soil physics. In: HILLEL, D. E. (Ed.). **Spatial variability of soil physical properties in the field**. New York: Academic Press, 1980. 385p.

4 CAPÍTULO II - DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO POR MEIO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO, E MAPAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO E SOJA PRODUZIDOS NO CERRADO

4.1 RESUMO

A definição de zonas de manejo pode direcionar o plano de amostragem do solo e fornecer informações para a gestão do sistema de produção de grãos. Este trabalho teve como objetivo delimitar e validar zonas de manejo utilizando a análise do padrão espacial e estabilidade temporal da produtividade, o mapa de condutividade elétrica aparente do solo e o modelo digital de elevação em área de Cerrado produtora de soja e milho. A análise de dependência espacial das variáveis envolvidas foi realizada utilizando a geoestatística. Quando encontrada a dependência espacial os mapas de contorno foram elaborados por meio da krigagem ordinária. Para delimitar as zonas de manejo, utilizou-se o algoritmo fuzzy K-means, e a determinação do número ótimo de classes foi realizada pelo Índice de Performance Fuzzy e pela Entropia de Partição Modificada. Utilizando o teste do coeficiente Kappa, foi feita a análise de concordância entre o mapa gerado das zonas de manejo e os mapas dos atributos do solo. O número ótimo de classes foi igual a três. Dos atributos do solo estudados não foi encontrada dependência espacial para potássio, matéria orgânica e saturação por alumínio. O mapa do padrão espacial e estabilidade temporal da produtividade, o modelo digital de elevação e o mapa de condutividade elétrica aparente do solo em conjunto, podem ser utilizados para determinar zonas de manejo, pois houve correlação do mapa das zonas de manejo com os mapas de atributos físico-químicos do solo de importância agrônômica. Não foi identificada diferenças entre as médias de cada classe de manejo para os atributos químicos. As zonas de manejo delimitadas apresentaram médias diferentes para duas classes de manejo referente a granulometria do solo e elevação do terreno.

Palavras chave: Agricultura de Precisão, Análise de Agrupamentos, Fuzzy K-Means, Coeficiente Kappa.

DEFINITION OF MANAGEMENT ZONES USING SOIL APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY, DIGITAL ELEVATION MODEL AND YIELD MAPS OF CORN AND SOYBEAN PRODUCED IN CERRADO REGION

4.2 ABSTRACT

The definition of management zones can direct soil sampling plan and provide information for the decision making process of grain production systems. The objective of this study was to define and validate management zones using a map that represents the spatial variability pattern and temporal stability of yield, the map of apparent soil electrical conductivity and the digital elevation model in an area of Cerrado that is used for producing soybeans and corn. The spatial dependence analysis of the variables involved was performed using geostatistics. The contour maps were prepared by ordinary kriging. The Fuzzy K-Means Algorithm was used to define the management zones, and the number of classes was the one that minimized the Fuzzy Performance Index and the Modified Partition Entropy. The correlation between the generated map of management zones and maps of soil attributes was analyzed using the Kappa test. The optimal number of classes was equal to three. The soil properties studied that did not present spatial dependence were potassium content, organic matter content and aluminum saturation. The map of spatial variability trend and temporal stability of yield, the digital elevation model and the map of apparent soil electrical conductivity together can be used to delimit the management zones, as this map correlated with physicochemical soil attribute maps of agronomic importance. It was not identified differences between the means of each management class for the soil chemical attributes. The defined management zones showed different averages for two management classes related to soil texture and terrain elevation.

Key-Words: Precision Agriculture, Cluster Analysis, Fuzzy K-Means, Kappa Coefficient.

4.3 INTRODUÇÃO

A adoção de sistemas de agricultura de precisão (AP) vem crescendo em relação ao uso dos sistemas de cultivo convencionais. As principais razões da migração para a agricultura de precisão fundamentam-se na necessidade de redução de custos e de melhoria na eficiência dos sistemas de produção e a mecanização agrícola, que tem disponibilizado equipamentos e de técnicas para o manejo em sítios específicos. Entretanto, a interpretação dos dados gerados pelos sistemas de agricultura de precisão vem sendo considerada um dos maiores entraves na consolidação deste sistema no Brasil.

A AP precisa de regras para estabelecer as dosagens de insumos a serem aplicadas em cada ponto da área de produção (KÜHN et al., 2009). Agricultura de precisão é um conceito de sistema agrícola que envolve a utilização de técnicas com o objetivo de identificar, analisar e gerenciar a variabilidade espacial e temporal de fatores que determinam a produtividade das culturas dentro de campos, a fim de aumentar a rentabilidade e buscar a redução do impacto ambiental (DUFFERA et al., 2007; SINGH et al., 2011).

Atualmente, a subdivisão dos campos de produção em zonas de manejo vem sendo usada pelos produtores para tratar a variabilidade dos atributos do solo que limitam a produtividade das culturas (LI et al., 2008). O estabelecimento das zonas de manejo pode direcionar o plano de amostragem do solo, fornecer informações fundamentais para o manejo, além de separar áreas com mesmo potencial de produção (LI et al., 2007). Geralmente, as informações de campo utilizadas para definir zonas de manejo são baseadas em informações ligadas aos atributos do solo, mapas de condutividade elétrica aparente do solo, modelos digitais de elevação, mapas criados usando sensoriamento remoto e de mapas de produtividade de mais de uma safra (FLEMING et al., 2004; LI et al., 2007; VALENTE et al., 2012)

A variabilidade da produtividade pode ser causada por vários fatores, sendo a topografia um dos fatores mais frequentemente relacionados com a produtividade (KRAVCHENKO e BULLOCK, 2000; KRAVCHENKO e BULLOCK, 2002; MARQUES DA SILVA e SILVA, 2008; KUMHÁLOVÁ et al., 2011). A topografia do terreno, caracterizada pelo modelo digital de elevação (MDE), é útil para delimitar zonas de manejo, uma vez que a declividade do terreno influencia no transporte de

partículas, umidade e nutrientes do solo, mesmo o terreno apresentando relevo suave.

O uso de ferramentas, como o modelo digital de elevação (MARQUES DA SILVA e SILVA, 2008; MCKINION et al., 2010; SILVA JÚNIOR et al., 2012) e o mapa de condutividade elétrica aparente do solo (VALENTE et al., 2012; ALVES et al., 2013), são cada vez mais comuns em ciências agrárias e auxilia na caracterização das áreas de produção. O MDE é uma ferramenta eficaz no mapeamento de solo e é utilizado para relacionar a topografia do terreno com as propriedades do solo (SOUSA JUNIOR e DEMATTÊ, 2008). Alguns pesquisadores (CORWIN e LESCH, 2003, 2005; MACHADO et al., 2006; MORARI et al., 2009; MORAL et al., 2010; VALENTE et al., 2012; ALVES et al., 2013; SCUDIERO et al., 2013; COSTA et al., 2014) têm demonstrado a importância da determinação condutividade elétrica aparente do solo (CEa) como ferramenta para caracterizar a variabilidade dos atributos físico-químicos do solo e da produtividade das culturas. Além disso, os autores têm destacado a facilidade de medição e a confiabilidade da determinação da CEa. Taylor et al. (2007) destacam que os dados CEa e elevação fornece maior confiabilidade ao algoritmo de análise de agrupamento e é indicativo do potencial de produtividade. Quando a delimitação da classe é feita apenas em dados de produtividade, é difícil diferenciar entre as respostas reais e os potenciais de produtividade dentro das classes, o que torna complexo a tomada de decisões.

O método de delimitação de zonas de manejo mais utilizado tem por base a análise de agrupamento Fuzzy C-Means (lógica nebulosa para agrupar c-médias) (ODEH et al., 1992; TAYLOR et al., 2007; MORAL et al., 2010). Esse método consiste em procurar uma partição que minimize uma função objetivo (FRIDGEN et al., 2004; MINGOTI, 2007; ZHANG et al., 2009; ZHU et al., 2010). É um tipo de classificação não supervisionada em que o usuário define o número de classes em que a área será subdividida.

Para determinar o número ideal de classes, dois índices têm sido utilizados: o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) (ODEH et al., 1992; FRIDGEN et al., 2004). O número ótimo de classes é aquele que torna mínimo o valor dos dois índices (FRIDGEN et al., 2004; SUN et al., 2011). Com as zonas de manejo definidas, pode-se inferir sobre as causas da variabilidade temporal da produtividade, avaliar sua utilidade no manejo da cultura e recomendar doses ideais de corretivos e fertilizantes para aplicação a taxa variável.

Este trabalho teve como objetivo delimitar zonas de manejo com base na análise da variabilidade espacial e estabilidade temporal de produtividade de soja e milho de quatro safras, mapa de condutividade elétrica aparente do solo e o modelo digital de elevação e validar as zonas de manejo delimitadas, analisando a variabilidade dos atributos do solo no interior de cada zona.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Caracterização da área

O experimento foi conduzido em uma área de 175 ha da fazenda Novo Horizonte, localizada no município de Gameleira de Goiás, GO, com altitude média de 1040 m, longitude 48° 42' O e latitude 16° 22' S. O solo predominante da área é o Latossolo Vermelho com textura média. A declividade da área varia de 1 a 5 %.

A fazenda Novo Horizonte foi selecionada para o trabalho por ser uma propriedade com alto nível tecnológico, apresentar boa organização administrativa e operacional e se situar em uma região produtora de grãos. Além do mais, na área de estudo, o plantio direto foi utilizado há 15 anos com as culturas de soja e milho em sucessão, as quais foram utilizadas nesta pesquisa. Em 2010, foi iniciada a geração de mapas de produtividade com uma colhedora combinada.

4.4.2 Coleta de dados

Para sistematização da área foi utilizada uma grade amostral regular de 100 x 100 m, totalizando 175 pontos (Figura 4.1). Em cada ponto do grid amostral, foram coletadas amostras de solo para análises físicas, químicas e físico-químicas.

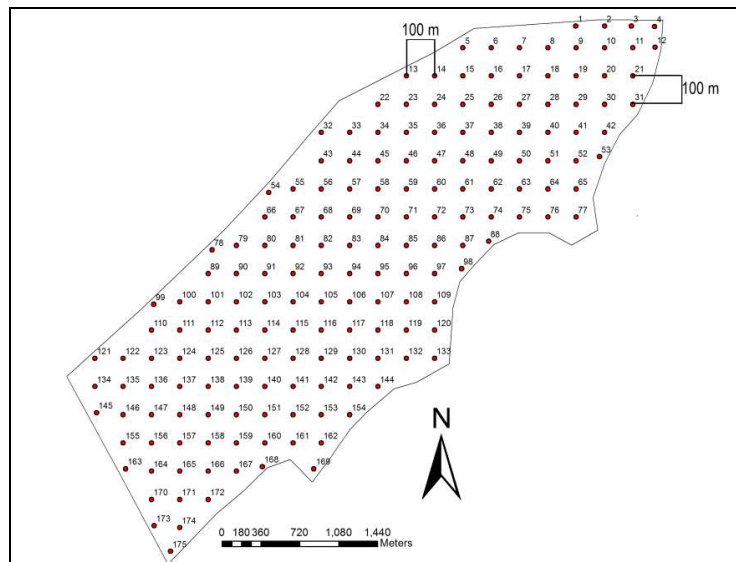


Figura 4.1 - Croqui da área experimental e representação do grid amostral.

4.4.3 Atributos químicos e físicos do solo

As amostras de solo para análises químicas e físicas foram coletadas na camada de 0,0 a 0,20 m de profundidade. As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de trado tipo holandês. Cada amostra deformada foi composta de três amostras simples, coletadas em um raio de cinco metros em torno de cada ponto da grade amostral. As amostras de solo foram coletadas anterior a safra de 2013, no período de estiagem, o solo encontrava-se no limite friável, e o mês que antecedeu a coleta o produtor realizou a correção da acidez do solo com aplicação de calcário.

Na análise química do solo, foram determinados, segundo metodologias propostas pela EMBRAPA (2011), o pH, a acidez potencial ($H + Al$), os teores disponíveis de P, K e Na, Zn, Fe, Mn e Cu; teores trocáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} , e o teor de matéria orgânica (MO). Após a análise química, foram calculados os seguintes atributos de fertilidade do solo: capacidade de troca catiônica efetiva (CTC), saturação por alumínio (M %) e saturação por bases (V). A análise física consistiu da análise de granulometria (EMBRAPA, 2011)

4.4.4 Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)

Os dados de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foram coletados logo após a coleta de dados de solo para análises químicas logo após as primeiras chuvas,

quando o solo se apresentava com umidade próximo a capacidade de campo, e na área já haviam implantado a cultura soja. Foi utilizado um aparelho portátil fabricado por *Landviser*, modelo Land Mapper® ERM 02. Esse equipamento emprega o método da resistividade, sendo a medida feita por meio do contato de quatro eletrodos com o solo, permitindo que se empreguem diferentes configurações de eletrodos. A configuração dos eletrodos utilizada foi a de *Matriz de Wenner*, com espaçamentos de 0,20 m entre eletrodos. Com essa configuração obtém-se a condutividade elétrica aparente do solo para a camada de 0 a 0,20 m de profundidade (CORWIN e LESCH, 2005). Cada ponto foi constituído pela média de cinco determinações coletadas aleatoriamente a uma distância de até 5 m do ponto amostral (LI et al., 2008). Na data da determinação da CEa, foram recolhidas, aleatoriamente, 60 amostras de solo na camada de 0 a 0,20 m, pesadas e levadas à estufa de ventilação forçada de ar a uma temperatura de 105°, onde permaneceram até atingir peso constante para determinação do teor de água do solo.

4.4.5 Mapa de Produtividade

O monitoramento da produtividade das culturas do milho e soja foi realizado com auxílio de uma colhedora John Deere®, modelo STS 9650, com receptor GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélites) com correção diferencial em tempo real, via satélite Omni Star, equipada com sistema de monitoramento da produtividade “Green Star” (John Deere®). Foram utilizados os mapas de produtividade gerados nas safras 2008-2009 (MP2009) com milho, 2009-2010 (MP2010) com soja, 2010-2011 (MP2011) com milho, e 2012-2013 (MP2013) com soja. Os dados de produtividade foram padronizados para o teor de água de 13 % para a soja e de 15 % para o milho, em base úmida.

Os dados de produtividade foram importados em formato *shape* para o *software* ArcGis, versão 10 (Environmental Systems Research Institute®), e transformadas em formato *raster*, para cada ponto (MCKINION et al., 2010). Após essa transformação, as coordenadas geográficas dos pontos amostrais foram sobrepostas no *raster*. O sistema de coordenadas projetadas utilizado foi UTM SIRGAS 2000, Zona 22S. Posteriormente, as coordenadas com respectivos valores de produtividade foram exportadas para um arquivo texto (txt). A partir dos arquivos txt foi criada uma planilha com as coordenadas geográficas e os valores de produtividade de cada ponto amostral para todas as safras.

Os dados de produtividade foram filtrados para retirada dos valores discrepantes. Os valores considerados discrepantes foram as produtividades nulas e os valores menores que a média menos 2,5 vezes o desvio padrão e maiores que a média mais 2,5 vezes o desvio padrão (JUERSCHIK e GIEBEL, 1999; FLORIN et al., 2009). Antes da remoção, estes valores discrepantes foram visualizados na área de estudo para garantir que eles não fossem dados reais.

Para obtenção do mapa de contorno da produtividade, após a retirada de valores discrepantes, foi feita, conforme item 4.4.8, análise geoestatística dos dados de produtividade; e utilizando a krigagem ordinária (MCKINION et al., 2010), foi feita a interpolação dos valores para a geração dos mapas temáticos da distribuição espacial da produtividade. Essa análise foi realizada para garantir que todos os mapas gerados tivessem o mesmo número de pixels e pudessem ser sobrepostos.

Para obtenção do mapa do padrão espacial e estabilidade temporal da produtividade (MPClass), os dados de produtividade, de todas safras, foram normalizados para que pudessem comparar culturas diferentes, realizou-se a análise de do padrão espacial em cada ano, posteriormente, foi feita a análise da variância temporal e desvio padrão temporal, entre os anos, segundo metodologia de Blackmore et al. (2003). O mapa do padrão espacial foi classificado em classes de alta produtividade e baixa produtividade. O mapa de estabilidade temporal foi obtido pelo desvio padrão temporal, foi classificado em classes de produtividade estáveis e classes de produtividade instáveis. Esses mapas de classificação simples foram unidos e gerados um novo mapa em que os pontos foram classificados em quatro classes de produtividade: AE (Alta e Estável); AI (Alta e Instável); BE (Baixa e Estável); e BI (Baixa e Instável).

4.4.6 Determinação do modelo digital de elevação (MDE)

Para o desenvolvimento do modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo, foram utilizados os dados de levantamento topográfico obtidos pelo GNSS Topográfico da Marca Magellan, modelo Promark 3. Para a correção diferencial, foram utilizados os dados da base da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE, localizada em Brasília, utilizando o software GNSS Solutions da Magellan para a correção dos dados. Esses dados levantados, juntamente com as coordenadas dos pontos

amostrais coletados durante a amostragem do solo, foram importados para o *software* ArcGis, versão 10 (Environmental Systems Research Institute®), para obtenção do modelo digital de elevação.

O modelo digital de elevação (MDE) tem por base uma grade com cada célula contendo as coordenadas de localização (x e y) e um valor de elevação ou altitude (z), sendo assim, um fator estável em relação a outras fontes de dados necessários para a agricultura de precisão (BLOMGREN, 1999; SCHMIDT e PERSSON, 2003; AGUILAR et al., 2005). O MDE foi utilizado para relacionar a topografia do terreno com os atributos do solo e a produtividade das culturas. Na Figura 4.2 é apresentado o MDE da área em estudo obtido por krigagem ordinária utilizando uma malha de 9,94 x 9,35 m. A declividade variou de 1 a 5%. As áreas com menor altitude localizam-se ao sul do mapa.

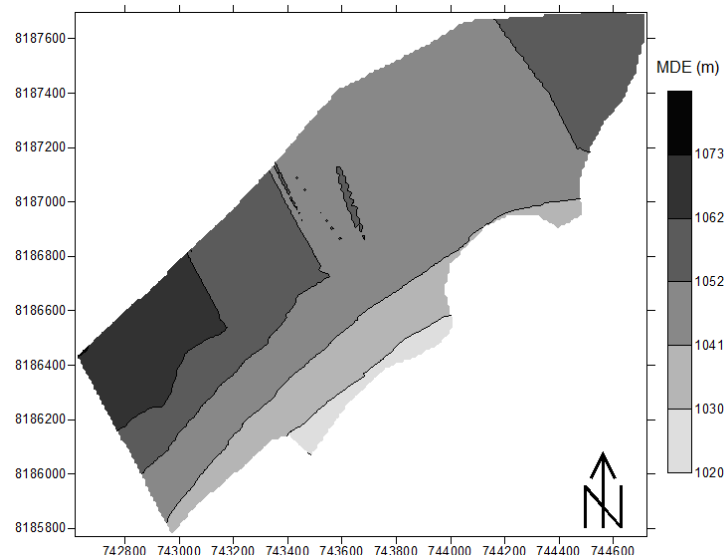


Figura 4.2 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo obtido pela krigagem ordinária.

4.4.7 Análise exploratória dos dados

Os dados primeiramente foram submetidos a uma análise exploratória para verificar a presença de valores discrepantes. Foi utilizado metodologia proposta de LIBARDI et al. (1996), segundo a qual o limite crítico para estes valores é definido a partir da dispersão interquartil (DQ), sendo o limite superior definido por $(Q3 + 1,5 \times DQ)$ e o inferior por $(Q1 - 1,5 \times DQ)$, em que Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

A análise exploratória dos dados foi realizada para verificar a distribuição estatística dos dados de produtividade e dos atributos do solo. Estes dados foram analisados por meio das medidas de posição e dispersão, assimetria e curtose.

Para interpretação do coeficiente de assimetria (C_s), utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da simetria, foi adotado como critério que para $C_s > 0$, obteve uma distribuição assimétrica à direita; para $C_s < 0$, a distribuição foi assimétrica à esquerda; e para $C_s = 0$, a distribuição foi simétrica. O coeficiente de curtose (C_k) mostra a dispersão (achatamento) da distribuição em relação à curva normal, e como critério para sua interpretação, foi adotado que para $C_k = 0$, a distribuição foi mesocúrtica; para $C_k < 0$, ela foi platicúrtica; e para $C_k > 0$, ela foi leptocúrtica.

4.4.8 Análise geoestatística

Para caracterizar a variabilidade espacial da produtividade das culturas, da elevação (definida pelo MDE) e dos atributos físicos, químicos e físico-químicos do solo, os dados foram submetidos a métodos geoestatísticos pelo estudo de semivariogramas (BACHMAIER e BACKES, 2008), utilizando o programa GS+ versão 7.0 (Gamma Design Software®) (ROBERTSON, 1998).

Os semivariogramas foram obtidos considerando a isotropia da dependência espacial para todos os atributos. Para escolher o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, considerou-se o maior R^2 (coeficiente de determinação) e a menor soma de quadrados dos resíduos (SQR). A interpolação e a confecção dos mapas temáticos foram feitas utilizando o método da krigagem ordinária.

Para a geração dos mapas de variabilidade espacial, todas as interpolações foram feitas utilizando um tamanho de pixel de 9,94 m x 9,35 m para as coordenadas X e Y e o mesmo polígono de contorno. Esta padronização garante que todos os mapas gerados tenham o mesmo número de pixels e possam ser sobrepostos.

Para definir o índice de dependência espacial (IDE) dos atributos físicos, químicos e físico-químicos do solo, da produtividade e do MDE, foi utilizada a relação entre a contribuição e o patamar, semelhante aos apresentados por Zimback (2001). Este autor considera a dependência espacial fraca para valores até 25 %; entre 25 % e 75 %, moderada; e acima de 75 %, dependência espacial forte.

4.4.9 Correlação de Pearson

A análise de correlação de Pearson, com teste de significância para hipótese da nulidade ($H_0, r = 0$), foi feita a partir do programa R. Foi avaliada a correlação existente entre os mapas de atributos físicos, químicos e físico-químicos do solo, os mapas de produtividade dos diferentes anos e o mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade. Do conjunto de dados krigados foram retiradas 30 amostras aleatórias para realização da análise. Essa análise foi feita para os atributos do solo que possivelmente estão limitando a produtividade.

4.4.10 Delimitação das zonas de manejo

Os mapas interpolados pela krigagem ordinária da condutividade elétrica aparente do solo, do modelo digital de elevação e o mapa de tendência de variabilidade espacial e temporal da produtividade foram analisados utilizando o algoritmo de agrupamento Fuzzy c-means com o objetivo de delimitar as zonas de manejo (ORTEGA e SANTIBÁÑEZ, 2007). Para a classificação, os dados foram normalizados para média zero e variância igual a um, o número máximo de interações foi definido como sendo igual a 100, e o coeficiente fuzzy, igual a dois.

Foi utilizado o *software* MZA, desenvolvido por Fridgen et al. (2004). A classificação foi repetida para um intervalo de classes entre 2 e 5. Dois índices foram utilizados para definir o número ideal de zonas: o FPI (Índice de Performance Fuzzy) e a MPE (Entropia da Partição Modificada) (ODEH et al., 1992; FRIDGEN et al., 2004; LI et al., 2008; GUASTAFERRO et al., 2010). O FPI é uma medida do grau de separação dos membros das diferentes classes. O MPE estima o grau de desorganização criado por um determinado número de classes. Os índices FPI e MPE podem variar de 0 a 1. Valores próximos de 0 (zero) indicam classes distintas com poucas amostras de baixa adesão; próximos a 1 (um) indicam classes não distintas, com um elevado número de amostras de baixa adesão. Dessa forma, o número ótimo de classes ocorre quando os dois índices são mínimos (SONG et al., 2009; VALENTE et al., 2012).

4.4.11 Validação das zonas de manejo delimitadas

Para analisar a concordância entre as zonas de manejo criadas pela classificação Fuzzy c-means e os atributos do solo, utilizou-se o coeficiente Kappa, conforme metodologias apresentadas por Kitchen et al. (2005); Song et al. (2009) e Guastafarro et al. (2010). Foi feita uma tabulação cruzada entre os mapas de cada zona de manejo e as propriedades do solo.

Foi adotado para comparação das zonas 2 classes. O coeficiente Kappa de Cohen foi descrito na Equação 1, conforme sugerido por Hudson e Ramm (1987), a partir de uma matriz de erros.

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}} \quad (1)$$

em que:

$\hat{K}$ = Coeficiente Kappa

x_{ii} = valor na linha i e coluna i da matriz de erros;

$x_{i\oplus}$ = total da linha i;

$x_{\oplus i}$ = total da coluna i;

n = número de pontos amostrais; e

c = número de classes.

Quando se utiliza o algoritmo Fuzzy k-means, a rotulagem de classes ocorre aleatoriamente. Entretanto, uma reclassificação dos rótulos da zona de manejo foi feita com base na maximização da diagonal principal da matriz de confusão (RODRIGUES et al., 2005; VALENTE et al., 2012). Foi utilizado nesta reclassificação para otimização combinatória o algoritmo húngaro, proposto por Rodrigues et al. (2005). Depois de reclassificados os mapas das zonas de manejo e o cálculo da matriz de confusão, obteve-se o coeficiente Kappa. Este coeficiente indica o índice de concordância das zonas de manejo geradas com base na produtividade e as zonas de manejo dos atributos do solo. Assim, quando o índice de concordância for igual a 1, a concordância é perfeita; e quando for igual a 0, a concordância é devida ao acaso (GUASTAFERRO et

al., 2010). Desta forma, as classes de propriedades do solo foram consideradas dados reais, e o mapa zona de manejo foi considerado o classificador.

O coeficiente Kappa foi avaliado segundo a classificação estabelecida por Landis e Koch (1977). Os autores classificam o coeficiente como: “Péssimo”, k menor ou igual a 0; “Ruim”, k maior que 0 e menor ou igual a 0,20; “Razoável”, k maior que 0,20 e menor ou igual a 0,40; “Bom”, k maior que 0,40 e menor ou igual a 0,60; “Muito bom”, k maior que 0,60 e menor ou igual a 0,80; e “Excelente”, k maior que 0,80 e menor ou igual a 1.

Após a definição das zonas de manejo utilizou-se os dados krigados de cada variável em estudo e foram calculadas as medidas descritivas como média e desvio-padrão para cada zona de manejo. Para verificar a existência de diferença significativa entre as médias de cada classe de manejo foi empregado o método de Intervalo de Confiança (Equação 2) utilizado por Taylor et al. (2007), a 95% de confiança.

$$|Y_{Classe1} - Y_{Classe2}| \geq (\tilde{\sigma}1,96)^2 \quad (2)$$

em que:

$Y_{Classe1}$ = média da classe 1;

$Y_{Classe2}$ = média classe 2;

$\tilde{\sigma}$ = média dos desvios padrão dos valores estimados da krigagem.

O IC a 95% de confiança (1,96) foi calculado a partir da média dos desvios de cada valor estimado, em cada ponto pela krigagem. A média dos desvios padrão foi obtida a partir dos valores de cada estimativa do desvio padrão obtido em cada ponto amostral estimado.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Análise exploratória dos dados

Observa-se, na análise exploratória dos dados, que apenas oito das dezenove variáveis analisadas apresentaram valores discrepantes (Tabela 4.1), entre os 175

originalmente mensurados, que foram removidos da base de dados utilizada para análises subsequentes. A presença de valores discrepantes influencia principalmente a parte inicial do variograma, levando a conclusões errôneas. Além disso, a presença de valores atípicos entre dados amostrados pode exercer forte influência nos mapas, alterando a dependência espacial e, conseqüentemente, as interpretações (BORSSOI et al., 2011). Valores discrepantes quando presentes e isolados são anomalias locais que se não retirados podem influenciar fortemente o modelo global, assumido como válido para toda área (NESI et al., 2013). Em virtude disso, os pontos produziram valores discrepantes para pelo menos uma das oito variáveis e foram excluídos apenas os valores discrepantes de todas as análises para adequado ajuste dos modelos e interpretação dos mapas.

Tabela 4.1 - Número de valores discrepantes que foram descartados entre os 175 originalmente mensurados a partir das análises químicas e físicas do solo

<i>Variáveis</i>	<i>Número de valores discrepantes</i>
pH (CaCl ₂)	0
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	5
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	0
P (Melich) (mg.dm ⁻³)	2
K (mg.dm ⁻³)	0
Na (mg.dm ⁻³)	0
Cu (mg.dm ⁻³)	1
Fe (mg.dm ⁻³)	1
Mn (mg.dm ⁻³)	0
Zn (mg.dm ⁻³)	6
CTC (T) (cmol _c .dm ⁻³)	3
MO (%)	2
M (%)	0
V (%)	0
Argila (%)	0
Silte (%)	0
Areia (%)	0
CEa (mS.m ⁻¹)	2

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; K – potássio; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)-capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; M – saturação por alumínio V – saturação por bases; Cea – Condutividade elétrica aparente do solo;

Na Tabela 4.2 são apresentadas as estatísticas descritivas após a eliminação dos valores discrepantes, para os atributos do solo e para os mapas de produtividade. Os solos por possuírem ampla variação de atributos químicos são heterogêneos e, por influenciarem a produtividade agrícola em uma determinada área, devem ser manejados

da melhor forma possível (CHAVES et al., 2006). Os valores de assimetria (Cs) obtidos significam que as distribuições são assimétricas para os atributos estudados. O coeficiente de assimetria é sensível a valores extremos que a média e o desvio padrão, já que um único valor pode influenciar bastante este coeficiente (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989). Os valores de assimetria negativa demonstram haver tendência de concentração dos valores acima da média sendo mais evidente tal tendência quanto houver um valor bem menor que a média; para valores positivos deste coeficiente a situação é inversa. Observa-se que apesar dos atributos apresentarem assimetria, essa assimetria não é acentuada uma vez que apresentam valores de média e mediana em sua maioria próximos entre si o que atende às condições de normalidade. No entanto, Cressie (1991) explica que a geoestatística não exige normalidade dos dados para ser aplicada, é conveniente que a distribuição não apresente caudas muito alongadas.

Tabela 4.2 - Estatística descritiva dos atributos do solo e dos mapas de produtividade.

<i>Variáveis</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>DP</i>	<i>Var</i>	<i>Ck.</i>	<i>Cs.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>CV (%)</i>
pH (CaCl ₂)	5,60	5,60	0,25	0,06	0,43	-0,46	4,70	6,30	4,46
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	4,41	4,30	1,25	1,55	3,40	1,32	2,20	9,80	28,24
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	1,40	1,30	0,51	0,27	1,34	1,01	0,30	3,30	36,88
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	2,07	2,00	0,59	0,35	-0,25	0,40	0,80	3,60	28,69
P (Melich) (mg.dm ⁻³)	4,64	3,00	5,39	29,08	5,44	2,32	1,00	28,00	116,03
K (mg.dm ⁻³)	53,47	52,00	19,39	376,04	2,09	0,94	4,00	140,00	36,26
Na (mg.dm ⁻³)	1,91	2,00	0,87	0,75	-0,90	0,45	1,00	4,00	45,38
Cu (mg.dm ⁻³)	0,40	0,30	0,30	0,09	9,38	2,69	0,10	2,00	75,31
Fe (mg.dm ⁻³)	12,46	9,00	10,54	110,96	23,38	4,38	4,00	82,00	84,50
Mn (mg.dm ⁻³)	5,75	4,00	4,12	17,01	4,62	1,79	1,00	25,00	71,68
Zn (mg.dm ⁻³)	0,27	0,20	0,32	0,11	8,81	3,08	0,10	1,70	118,51
CTC (T) (cmol _c .dm ⁻³)	8,01	7,80	1,51	2,28	2,95	1,26	4,54	14,38	18,84
MO (%)	2,95	2,70	0,51	0,26	2,74	-0,11	0,70	4,80	17,13
M (%)	0,02	0,00	0,22	0,05	175,00	13,23	0,00	2,86	1322,88
V (%)	73,35	74,27	8,80	77,50	0,09	-0,46	48,20	93,30	12,00
Argila (%)	30,62	29,00	10,42	108,65	-0,29	0,15	8,00	55,00	34,04
Silte (%)	18,71	18,00	5,68	32,22	-0,29	-0,33	3,00	30,00	30,34
Areia (%)	50,67	51,00	15,69	246,09	-0,42	0,07	17,00	89,00	30,96
CEa (mS.m ⁻¹)	4,44	4,60	1,75	3,07	-0,12	0,04	1,04	9,96	39,46
Teor de água (%)	29,54	31,79	6,41	41,20	-0,03	-1,00	13,42	37,33	21,73
Altitude(m)	1044,89	1044,10	10,25	105,02	-0,32	0,24	1020	1073	0,98
MP2009(t.ha ⁻¹)	10,06	10,23	1,10	1,22	1,69	-1,02	4,69	13,10	10,99
MP2010(t.ha ⁻¹)	3,18	3,19	0,37	0,13	0,46	-0,31	1,76	4,61	11,59
MP2011(t.ha ⁻¹)	10,05	10,06	0,54	0,29	0,19	-0,08	7,06	12,38	5,36
MP2013(t.ha ⁻¹)	3,33	3,48	0,59	0,35	1,45	-1,17	1,00	4,66	17,77

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; K – potássio; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)-capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; M – saturação por alumínio V – saturação por bases; Cea – Condutividade elétrica aparente do solo; MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; Min, – mínimo; Máx, – máximo; DP – desvio padrão; Var, – variância da amostra; Cs, – coeficiente de assimetria; Ck, – coeficiente de curtose e CV – coeficiente de variação,

Analisando os valores do coeficiente de curtose (Ck) apresentados na Tabela 4.2,

parâmetro que indica o achatamento da distribuição de frequência dos dados, observou-se que apresentaram distribuição leptocúrtica (curva de distribuição alongada) 17 das 25 variáveis estudadas ($C_k > 0$). As demais variáveis tenderam a distribuição platicúrtica (curva de distribuição achatada), com valor de C_k abaixo de 0. Para interpretação do coeficiente de variação (CV) para classificação dos atributos do solo, foram utilizados os limites propostos por Warrick e Nielsen (1980), considerados baixos ($CV < 12\%$), médio ($12 < CV < 62\%$) e elevado ($CV > 62\%$). Segundo esse critério, as variáveis P, Cu, Fe, Mn, Zn e M apresentaram valores de coeficientes de variação elevados. Alves et al. (2014), em estudo anterior, também encontraram elevados valores de CV para as variáveis de P e Al. Os MP2009, MP2010 e MP2011 e pH apresentaram CV considerado baixo, significando um comportamento mais homogêneo da área em relação a essas variáveis. A maioria das variáveis apresentou CV médio. Esse comportamento pode estar relacionado ao manejo do solo e à característica dos solos do Cerrado, que geralmente são Latossolos e que por natureza são heterogêneos. O MDE apresentou um CV muito baixo (0,98%), devido à baixa declividade da área.

Os valores de coeficiente de variação elevados encontrados para os atributos P, Cu, Fe, Mn, Zn e M, podem ser devido aos efeitos residuais de adubações anteriores, pois a adubação, geralmente são feitas na linha de plantio enquanto que a correção da acidez do solo e a deposição dos restos culturais são realizadas a lanço, porém mesmo assim pode ser observado variabilidade no solo (CAVALCANTE et al., 2007). Silva et al. (2003) também observaram que mesmo a incorporação do calcário, seguidas de revolvimento do solo e as aplicações a lanço realizadas de forma homogênea sobre a área geram variabilidade no solo.

O pH do solo na área em estudo apresentou valor médio de 5,6, segundo critérios de interpretação apresentados por Ribeiro et al. (1999), esse valor de pH é considerado bom, não diferindo dos resultados encontrados em anos anteriores por Alves et al. (2014) que apresentou valor médio de 5,69. Analisando os dados apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram considerados de níveis muito bom e bom, iguais a $4,41 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Entretanto, uma das fontes de obtenção desses nutrientes é a prática da calagem, que foi realizada antes da coleta das amostras. Os teores de K, Mn e MO foram considerados com nível médio, iguais a $53,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $5,75 \text{ mg dm}^{-3}$ e $2,95 \%$, respectivamente. O teor de sódio, de $1,91 \text{ mg dm}^{-3}$, encontrado na área não é um valor considerado tóxico as

plantas. É importante salientar que o sódio é a principal fonte de salinização dos solos. A CTC (T) é uma característica físico-química fundamental ao manejo adequado da fertilidade do solo: quanto maior a CTC do solo, maior o número de cátions que este solo pode reter. Na área em questão, a CTC é classificada como média ($8,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). O solo é considerado fértil, pois apresentou 73,35 % de saturação por bases (V), o que indica quão perto o estado nutricional está do potencial de fertilidade para as culturas, sendo propícia para o bom desenvolvimento de soja e milho.

A análise dos atributos químicos do solo (Tabela 4.2) evidencia características típicas de solos de cerrados brasileiros, com valores médios a baixo de CTC (T) e baixos teores de matéria orgânica. Quanto maior o teor de matéria orgânica, maior a probabilidade de haver nitrogênio, enxofre e micronutrientes no solo. Também há nesse solo maior capacidade de retenção de nutrientes, melhor porosidade. O alto valor da saturação por bases se deve à aplicação de calcário como corretivo de acidez do solo, tendo como consequência um pH médio próximo do neutro. Nessas condições de baixa acidez, o Al é totalmente neutralizado e apresenta valor zero, sendo caracterizado pelos baixos valores da saturação por alumínio (M), 0,02 % e da acidez potencial trocável (H+Al). A acidez potencial trocável refere-se aos íons H^+ e Al^{3+} , que estão retidos na superfície dos coloides do solo por forças eletrostáticas. Esses valores são característicos dos Latossolos e corroboram aqueles encontrados em trabalhos anteriores (ALVES et al., 2014; COSTA et al., 2014).

A fertilidade alta da área pode ser explicada pelo efeito residual de consecutivas adubações anuais e considerada satisfatória para produção de milho e soja. Informações sobre os valores de pH, CTC e V, além de refletirem as características mineralógicas da fração argila, são úteis e necessárias para orientar o manejo das adubações de acordo com as características do solo (NOVAIS e MELLO, 2007). Assim, a necessidade de calagem não está somente relacionada com o pH do solo, mas também com sua capacidade tampão e sua capacidade de troca de cátions. Elevados valores pH reduzem a disponibilidade de alguns micronutrientes, tais como Fe, Cu, Mn e Zn. O conhecimento da disponibilidade dos micronutrientes no solo é fundamental para uma recomendação de adubação adequada, evitando assim problemas de deficiência ou de toxidez. Esses micronutrientes foram encontrados em níveis baixos, sendo necessárias adubações foliares para suprir as necessidades das plantas.

Para caracterizar as condições de teor de água durante as determinações da CEa,

foram coletadas amostras de solo, em 60 pontos aleatórios. Os valores médios de CEa e teor de água foram de 4,44 mS m⁻¹ e 29,54 %, respectivamente (Tabela 4.2). Os baixos valores de CEa obtidos concordam com valores normalmente observados para Latossolos, relatados por Machado et al. (2006). Costa et al. (2014) também encontraram valores semelhantes ao avaliar CEa em diferentes teores de água em um Latossolo Vermelho Amarelo. Os mesmos autores evidenciaram a existência de uma relação de dependência entre a CEa e o teor de água do solo, pois os valores médios da condutividade elétrica aparente do solo, obtidos em diferentes datas e para uma mesma área, foram significativamente correlacionados com os valores médios do teor de água do solo. O teor de água apresentou um CV de 21,73 %, valor considerado médio, e isso se deve à diferença de textura na área que também apresenta CVs médios. Costa et al. (2014) afirmaram que, em áreas cuja textura do solo apresenta alta variabilidade, o teor de água do solo em sua capacidade de campo deve acompanhar essa variação de textura. No entanto, por essa variabilidade não ser considerada alta, a variabilidade do teor de água implicou em menor participação desse fator na variabilidade da CEa. Isso significa que a variabilidade da CEa certamente está relacionada com atributos químicos e físicos do solo.

De acordo com a Tabela 4.2, os CVs (coeficientes de variação) dos mapas de produtividade (MP) ficaram entre 5,36 e 17,77 %, nos quatro anos analisados. Todos os anos apresentaram variabilidade considerada baixa, exceto o MP2013, em que a variabilidade da produtividade foi média. Esses valores estão abaixo aos encontrados por Amado et al, (2007) e Milani et al, (2006), que encontraram coeficiente de variação entre 12 e 27 %, estudando a variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja para as safras de 1999/2000 a 2004/2005.

4.5.2 Análise geoestatística e mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade

Para cada variável, foi quantificado o grau de dependência espacial (IDE), e para aquelas que não apresentaram efeito pepita puro, foi feito o ajuste das funções teóricas aos modelos experimentais de semivariograma (Tabela 4.3). Os gráficos dos semivariogramas teóricos ajustados estão apresentados no Apêndice.

Tabela 4.3 - Modelos teóricos de semivariância ajustados para os atributos do solo,

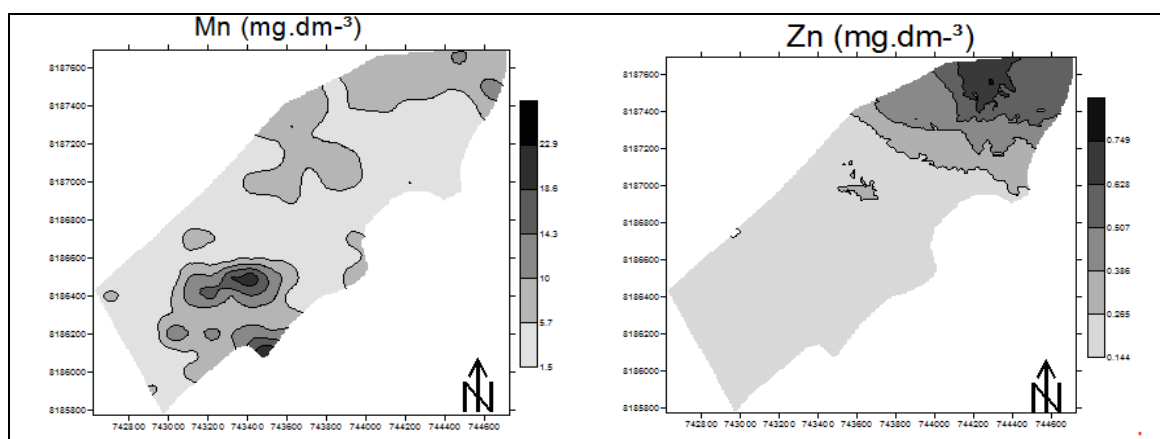
<i>Variáveis</i>	<i>Modelo</i>	<i>Alcance (A)</i>	<i>Patamar (C₀+C)</i>	<i>Efeito Pepita (C₀)</i>	<i>IDE (C/(C₀+C))</i>	<i>R²</i>	<i>SQR</i>	<i>VC</i>
pH (CaCl ₂)	Exponencial	198,00	0,06	0,01	0,89	0,72	8,02E ⁻⁵	0,75
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	Exponencial	447,00	1,26	0,00	0,99	0,92	0,05	0,86
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	Exponencial	693,00	0,29	0,14	0,50	0,81	2,28E ⁻³	0,85
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	Gaussiano	221,70	0,37	0,05	0,86	0,95	2,20E ⁻³	0,66
K (mg.dm ⁻³)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
P (mg.dm ⁻³)	Esférico	244,00	31,62	2,83	0,91	0,90	23,6	0,75
Na (mg.dm ⁻³)	Esférico	169,00	0,75	0,01	0,98	0,85	0,01	0,41
Cu (mg.dm ⁻³)	Gaussiano	225,17	0,10	0,00	0,99	0,64	3,67E ⁻³	0,34
Fe (mg.dm ⁻³)	Gaussiano	181,86	109,30	0,10	0,99	0,52	3352,00	0,96
Mn(mg.dm ⁻³)	Esférico	373,00	17,79	1,32	0,93	0,83	29,3	0,85
Zn (mg.dm ⁻³)	Gaussiano	3881,00	0,76	0,07	0,91	0,91	2,11E ⁻³	0,80
CTC (cmol _c .dm ⁻³)	Exponencial	369,00	1,74	0,20	0,88	0,92	0,06	0,90
MO (%)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
M (%)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
V (%)	Gaussiano	207,85	82,54	0,10	0,99	0,89	329	0,31
Argila (%)	Gaussiano	2689,87	231,90	64,30	0,72	0,98	544,00	0,94
Silte (%)	Gaussiano	3879,79	83,96	22,00	0,74	0,94	294,00	0,91
Areia (%)	Gaussiano	2622,32	488,60	151,00	0,69	0,92	27046,00	0,93
CEa (mS.m ⁻¹)	Esférico	656,00	3,13	0,80	0,74	0,97	0,12	1,07
Altitude (m)	Gaussiano	578,50	144,70	0,10	0,99	0,99	171,00	1,00
MP2009 (t.ha ⁻¹)	Exponencial	468,00	2,42	1,21	0,50	0,96	135,42	1,01
MP2010 (t.ha ⁻¹)	Exponencial	3184,00	0,56	0,28	0,50	0,98	1,61	1,01
MP2011 (t.ha ⁻¹)	Exponencial	156,00	3,49	0,53	0,85	0,54	2167,92	0,93
MP2013 (t.ha ⁻¹)	Exponencial	3625,00	0,78	0,38	0,52	0,99	2,91	1,05

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; K – potássio; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)-capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; M – saturação por alumínio V – saturação por bases; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; IDE – Índice de Dependência Espacial, VC – coeficiente de regressão da validação cruzada; R² - coeficiente de determinação e SQR – soma dos quadrados dos resíduos, EPP* – Efeito Pepita Puro,

Os atributos K, MO e M, obtiveram efeito pepita puro (Tabela 4.4). Para a maioria dos atributos, o IDE, proposto por Zimback (2001), obtido foi classificado como forte. Apenas os atributos Mg, argila, silte, areia e os MP2009, MP2010 e MP2013 apresentaram IDE classificado como moderado. Segundo Cambardella et al. (1994), os atributos que apresentam forte dependência espacial são mais influenciados por atributos intrínsecos do solo, como a textura e a mineralogia, enquanto os que apresentam fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, como aplicações de fertilizantes e sistemas de preparo e cultura, ou seja, estão relacionados com o manejo do solo.

O modelo que melhor se ajustou aos mapas de produtividade foi o Exponencial. Guedes Filho et al, (2010), ao analisarem vários mapas de produtividades de diferentes culturas, ajustaram o modelo Esférico aos dados de produtividade e encontraram IDE moderado. Os atributos estudados apresentaram coeficientes de regressão na análise de validação cruzada variando de 0,31 a 1,07, evidenciando que os modelos selecionados de semivariograma descrevem bem a dependência espacial das variáveis químicas avaliadas.

Para cada variável que apresentou dependência espacial, foi elaborado o mapa dessa variável, utilizando a krigagem ordinária como técnica de interpolação. Os mapas da distribuição espacial dos atributos do solo e mapas de produtividade que apresentaram dependência espacial são apresentados na



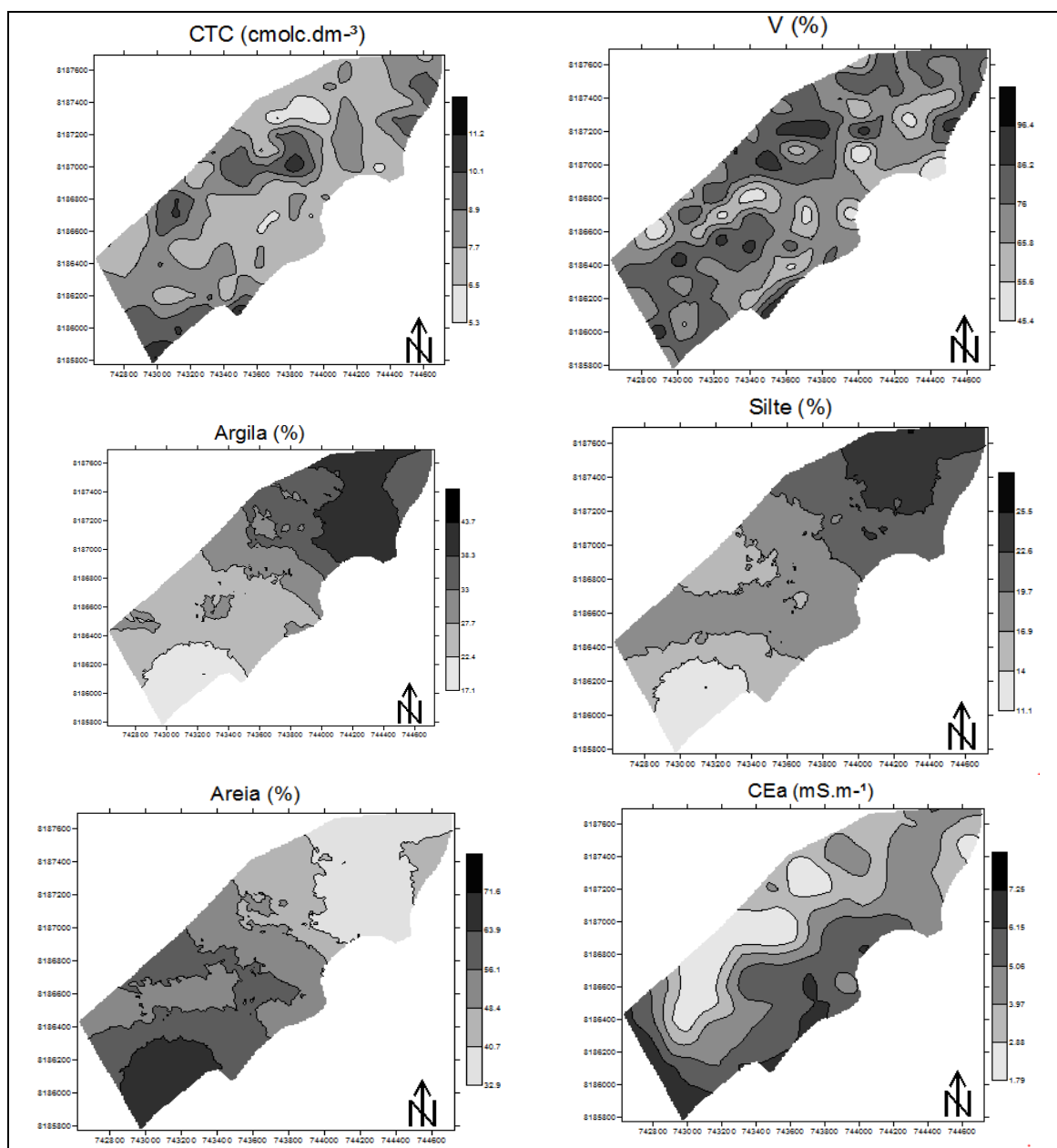
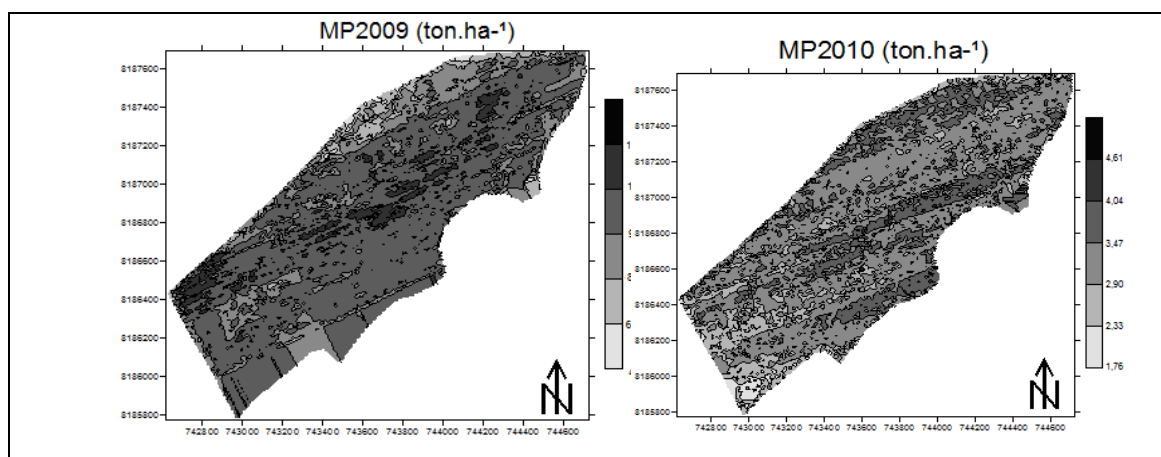


Figura 4.3 (Continuação) - Mapas de contorno dos atributos do solo e mapas de produtividades



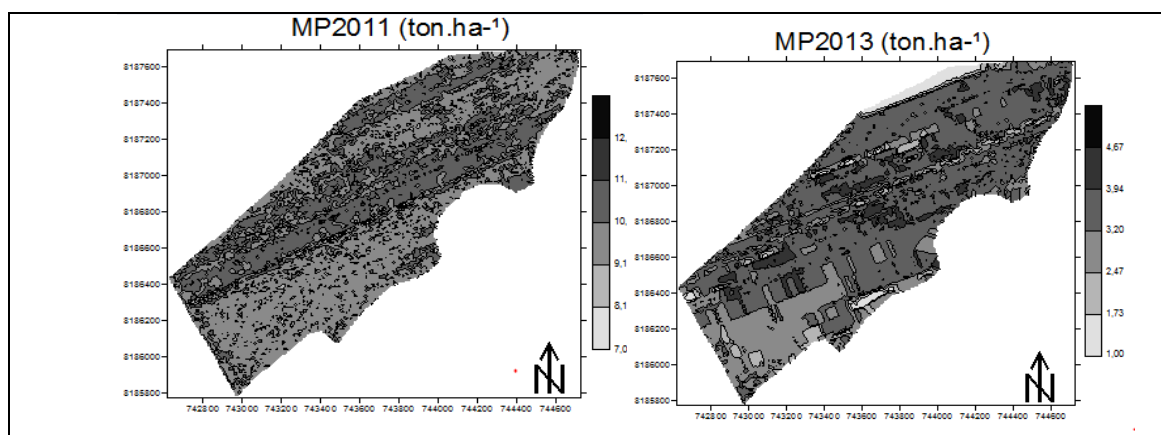
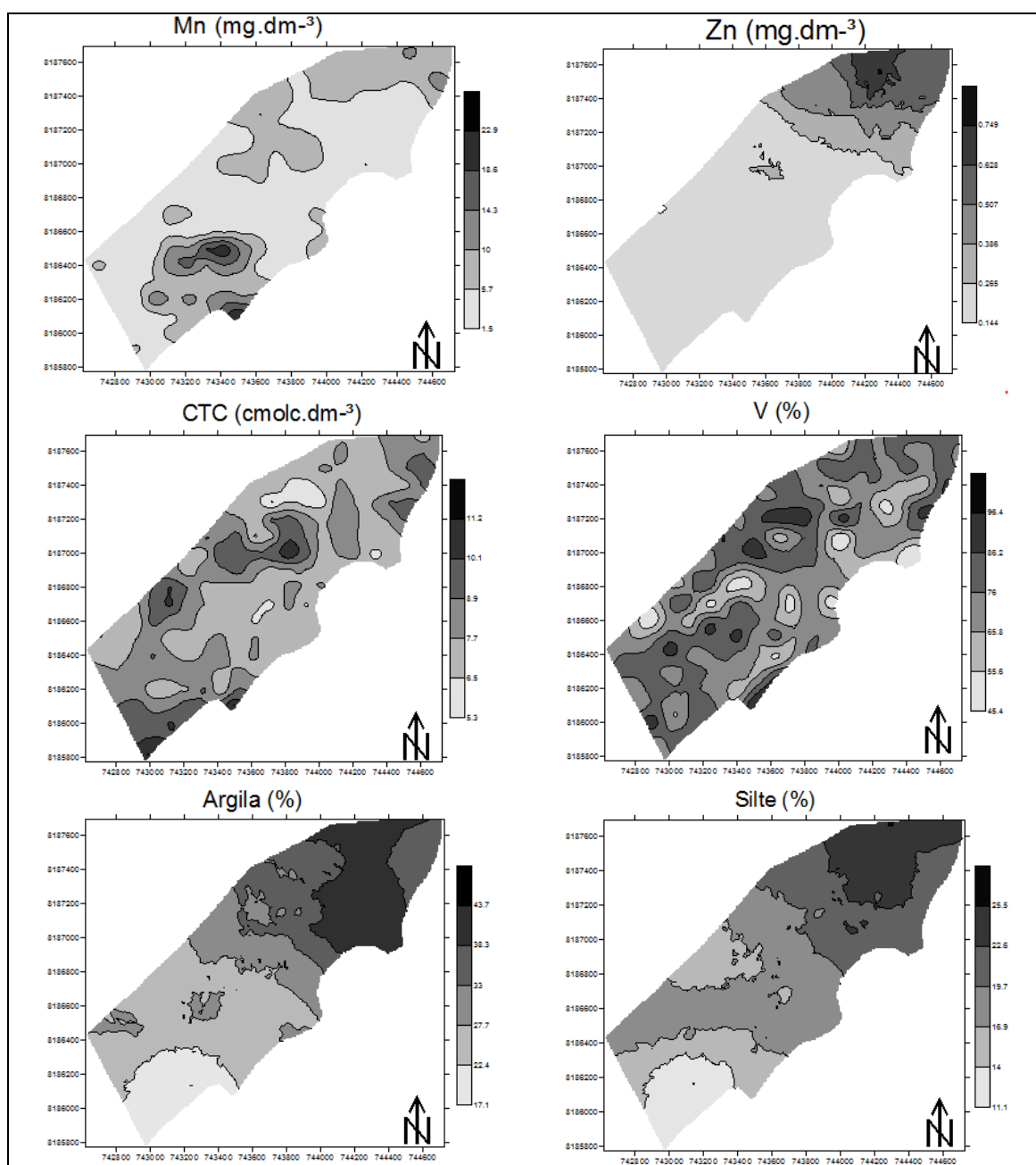


Figura 4.



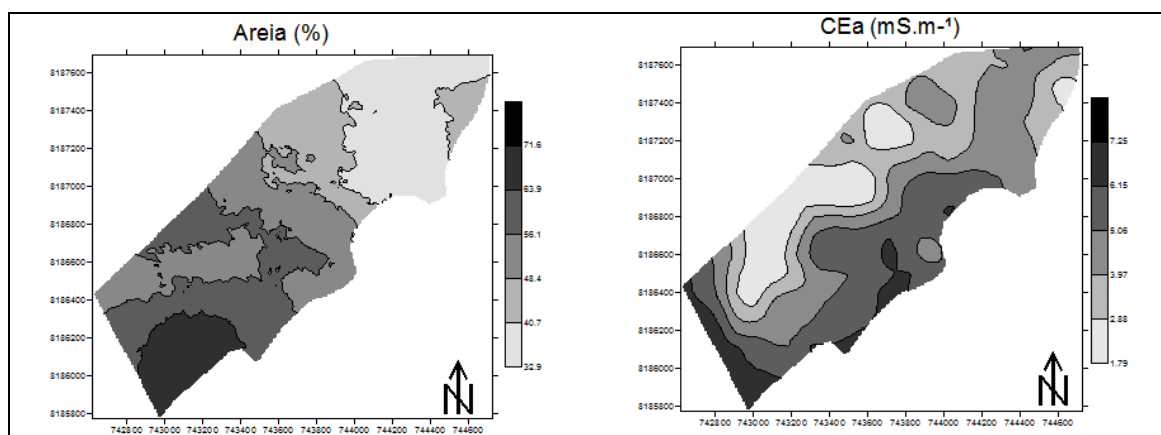


Figura 4.3 (Continuação) - Mapas de contorno dos atributos do solo e mapas de produtividades

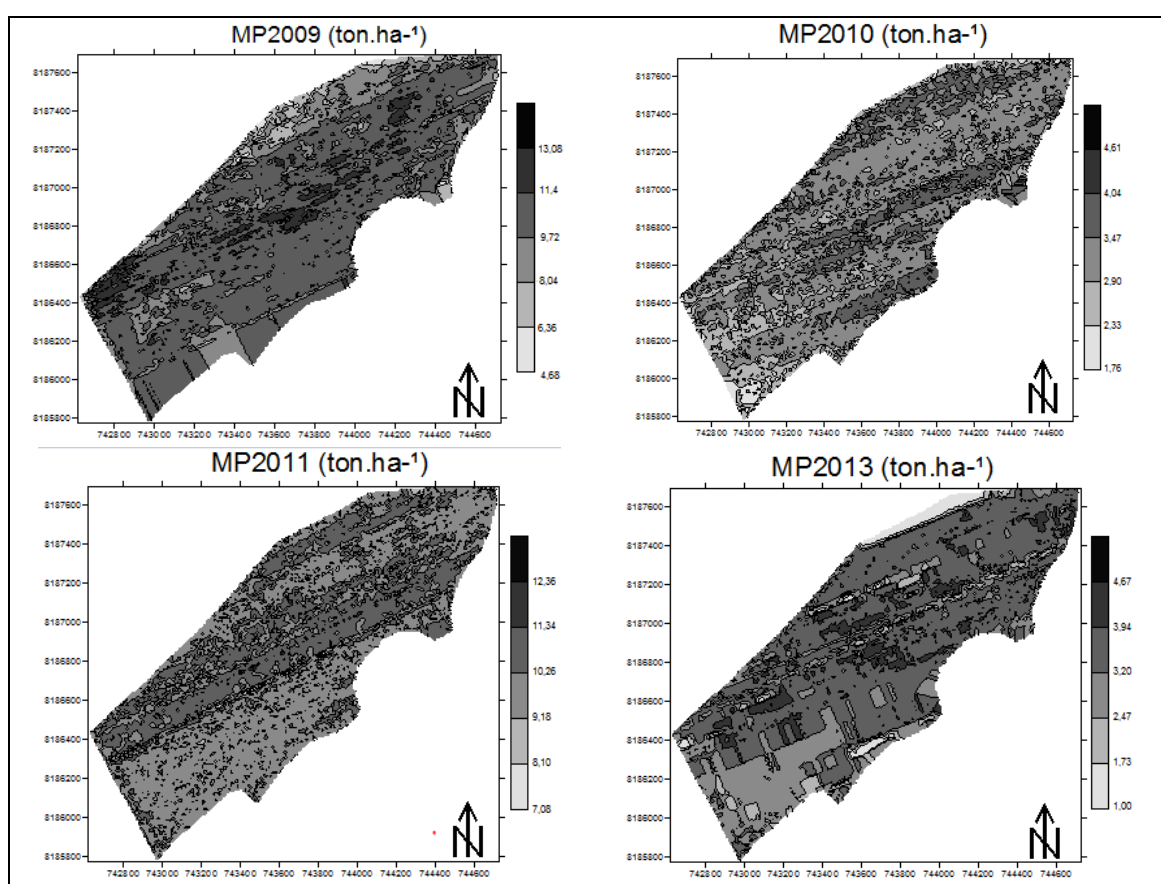


Figura 4.3 (Continuação) - Mapas de contorno dos atributos do solo e mapas de produtividades

Ainda na Figura 4.3, os mapas de contorno mostram bem definidas, principalmente pelas machas claras, para os atributos do solo. A análise conjunta dos mapas pôde-se verificar uma relação espacial entre os mapas de P, Cu, Fe e Mn. Os mapas de micronutrientes de solo revelaram variações consideráveis nas concentrações em toda a área de estudo. Os maiores valores de zinco foram observados ao norte da

área, não houve variação dos valores no centro-sul da área. As altas concentrações de Cu, Fe e Mn foram observadas ao sul da área, esse fato pode ser explicado que as coletas das amostras de solo coincidiram com a linha de adubação. Os mapas de produtividade apresentaram as maiores produtividades, para todas as safras, ao centro da área. Em todas as safras as menores produtividades foram observadas ao norte e ao sul do mapa, isso pode ser explicado pela existência de pedregulhos na área que por ocasião de veranicos mesmo que de poucos dias prejudica a absorção de água pelas culturas prejudicando assim seu desenvolvimento. A amplitude de CEa variou de 1,79 – 7,25 mS.m⁻¹, confirmando a variação média apresentada pelo CV. A distribuição espacial da CEa indicaram que as regiões de valores mais altos coincidem com as regiões com menor altitude (Figura 4.2) isso pode ser explicado pela lixiviação dos nutrientes para a regiões mais baixas.

Na Figura 4.3 é apresentado o mapa do padrão espacial e estabilidade temporal da produtividade de quatro safras de mapas de produtividade. Os pontos do mapa do padrão espacial foram classificados em alto ou baixo, quando permaneciam acima ou abaixo da média, e os pontos do mapa de estabilidade temporal foi classificado como estável ou instável quando o desvio padrão temporal era inferior ou superior a um limiar de 14%, respectivamente. Estas quatro classes simples foram combinadas nas seguintes classes compostas: AE (Alta e Estável), AI (Alta e Instável), BE (Baixa e Estável) e BI (Baixa e Instável). As extremidades da área apresentaram elevado grau de instabilidade temporal e baixa produtividade. O contrário pode ser verificado no centro da área, que apresentaram valores de produtividades normalizadas altas e estáveis. Baixas produtividades estáveis também foram observadas nos cantos, principalmente na região sul do mapa. O mapa mostra que os extremos norte e sul foram consistentemente de baixa produtividade. A área de baixa produtividade ao norte pode ser explicada pela existência de uma rodovia que também coincide com a entrada da fazenda, onde há intenso tráfego; além das culturas apresentarem pouco desenvolvidas devido a presença de pedregulhos que possuem baixa retenção de água e prejudica a absorção pelas plantas quando há veranicos, mesmo que por poucos dias. E as baixas produtividades ao sul, pelo fato de estar sob constante tráfego de máquinas, onde são feitas as reposições dos insumos além de ser depósito de insumos utilizados na área. Outro fato que pode ter ocorrido devido a algum erro na determinação da produtividade, seja pela má regulação do sensor de posicionamento da plataforma, seja pelo tempo de resposta entre o

momento que o fluxo de grãos medido e o tempo que o produto entrou na plataforma de corte da colhedora.

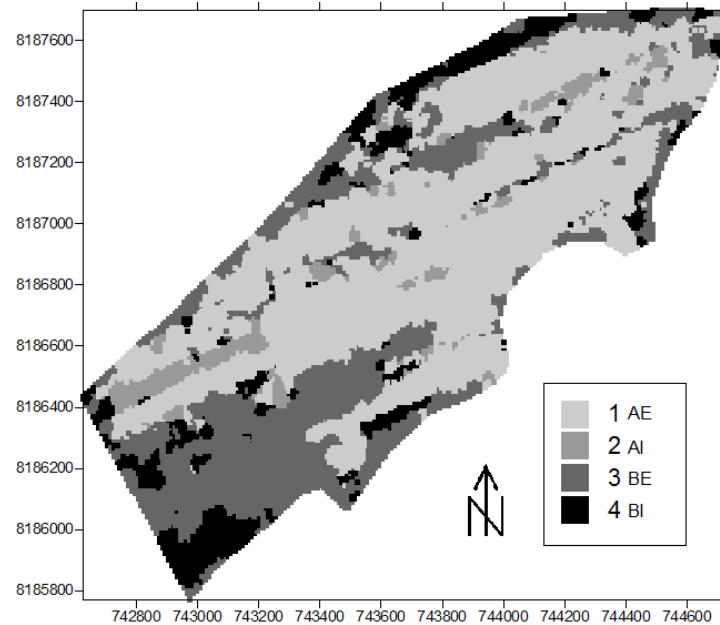


Figura 4.3 - Mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade. AE (Alta e Estável); AI (Alta e Instável); BE (Baixa e Estável); e BI (Baixa e Instável)

4.5.3 Correlação de Pearson

Visando a verificar o grau de associação entre as variáveis que apresentaram dependência espacial, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson. Na Tabela 4.4 é apresentado o coeficiente de correlação das variáveis que apresentaram dependência espacial. A correlação entre a CEa e o teor de água do solo foi de 0,48. Costa et al. (2014) comentaram que valores significativos de correlação indicam que a variabilidade espacial da CEa está associada à variabilidade espacial do teor de água do solo. Os autores ainda ressaltam que quando a variabilidade da textura no campo não for elevada, sua correlação com a CEa deve ser baixa ou mesmo nula. A baixa variabilidade do teor de água nessas condições implica menor participação dessa variável na variabilidade da CEa, e o mapa gerado nessas condições deve estar associado à variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo. Valente et al. (2012b) não encontraram correlação entre a CEa e o teor de água devido ao fato da área estudada por eles apresentar baixo coeficiente de variação do teor de água no solo.

Tabela 4.4 - Análise de correlação entre a CEa, MDE, produtividade e os atributos do solo que apresentaram dependência espacial

<i>Variável</i>	<i>MDE</i>	<i>CEa (mS.m⁻¹)</i>	<i>MP2009</i>	<i>MP2010</i>	<i>MP2011</i>	<i>MP2013</i>	<i>MPClass</i>
pH (CaCl ₂)	0.32	-0.03	0.44*	-0.19	-0.02	0.30	-0.23
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	0.14	-0.28	0.06	-0.15	-0.26	0.16	-0.11
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	-0.02	0.14	0.28	-0.26	-0.24	-0.01	-0.05
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	-0.53*	0.25	-0.50*	0.10	-0.32	-0.50*	0.51*
P (Melich) (mg.dm ⁻³)	0.25	-0.73*	0.26	-0.09	0.01	0.25	0.01
Na (mg.dm ⁻³)	0.18	-0.24	0.22	-0.07	0.11	0.36	-0.34
Cu (mg.dm ⁻³)	0.43*	-0.38*	0.16	0.16	0.19	0.58*	-0.32
Fe (mg.dm ⁻³)	0.21	-0.27	0.10	0.07	0.29	0.40*	-0.40*
Mn (mg.dm ⁻³)	-0.01	-0.18	0.17	0.02	0.06	0.29	-0.18
Zn (mg.dm ⁻³)	0.25	-0.08	0.02	0.06	0.47*	0.30	-0.35
CTC (T) (cmol _c .dm ⁻³)	-0.08	-0.07	0.07	-0.31	-0.37*	-0.10	0.15
V (%)	0.47*	-0.18	0.52*	-0.28	0.14	0.39*	-0.38*
Argila (%)	0.12	-0.08	-0.09	0.28	0.50*	0.23	-0.34
Silte (%)	0.16	-0.08	-0.08	0.30	0.51*	0.26	-0.36
Areia (%)	-0.13	0.08	0.09	-0.29	-0.51*	-0.24	0.35
MP2009(t.ha ⁻¹)	0.43*	-0.17	1.00	-0.33	0.36	0.48*	-0.52*
MP2010(t.ha ⁻¹)	0.05	-0.24	-0.33	1.00	-0.09	0.15	-0.12
MP2011(t.ha ⁻¹)	0.33	-0.06	0.36	-0.09	1.00	0.41*	-0.46*
MP2013(t.ha ⁻¹)	0.76*	-0.55*	0.48*	0.15	0.41*	1.00	-0.72*
MDE (m)	1.00	-0.49*	0.43*	0.05	0.33	0.76*	-0.49*
CEa (mS.m ⁻¹)	-0.49*	1.00	-0.17	-0.24	-0.06	-0.55*	0.26
Teor de água (%)	-0.65*	0.48*	-0.40*	-0.09	0.05	-0.60*	0.43*

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; V – saturação por bases; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; MDE – Modelo digital de elevação; MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; MPClass – Mapa de tendência de variabilidade espacial e temporal da produtividade; r – coeficiente de correlação; *significativo a 5% de probabilidade,

Não foi observada correlação entre condutividade elétrica aparente do solo e o teor de argila. Esse resultado pode ser devido ao coeficiente de variação do teor de argila ser relativamente baixo (34,04%). Machado, et al. (2006) obtiveram forte correlação entre condutividade elétrica e teor de argila e mostraram que a CEa medida por sensor de contato reflete adequadamente a variação nos teores de argila do Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto, para uso na definição de zonas de manejo. Entretanto, Valente, et al. (2012b) obtiveram correlação baixa entre a condutividade elétrica aparente do solo e a argila. Segundo estes autores, a CEa varia com uma série de fatores, sendo os quatro principais a umidade do solo, a percentagem

de argila, o tipo de argila e a concentração iônica na solução do solo. Para valores aproximadamente idênticos de umidade e salinidade do solo, quanto mais elevado for o teor de argila maior será a CEa. A possibilidade de mapear uma variável relacionada com o teor de argila é extremamente importante, dada a sua relação com características do solo como capacidade de troca catiônica e capacidade de retenção de água.

A CEa não apresentou correlação significativa com MP2009, MP2010 e MP2011. Somente com MP2013, foi verificada correlação significativa de -0,55. Isto se deve, provavelmente, aos nutrientes lançados ao solo e ser a safra em que foi feita a coleta de solo.

Nota-se correlação significativa negativa entre a CEa e o MDE de -0,49. Esse comportamento deve estar associado à variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, aos processos de erosão e deposição, ao escoamento superficial de água, ao transporte de sedimentos e nutrientes e ao armazenamento de água no solo. A combinação desses fatores que determinam a condutividade elétrica aparente do solo.

Já os coeficientes de correlação entre o MDE e as produtividades dos quatro mapas de produtividade foi para MP2009 e MP2013 de 0,43 e 0,76, respectivamente. Marques da Silva e Silva (2008), ao estudarem a relação espacial e temporal entre a produtividade de milho e os atributos topográficos, encontraram correlação negativa e significativa nos diferentes campos e anos estudados, indicando que as áreas mais baixas tendem a ter produtividades mais altas, fato não observado nesse estudo. Kumhálová, et al (2011) evidenciaram que as condições topográficas afetaram a produtividade das culturas nas áreas estudadas, porém essa relação foi mais evidente em períodos secos.

A existência de correlações positivas entre MDE e produtividade pode ser explicada pelo maior teor de argila na camada superficial do solo em locais mais elevadas da área (Figura 4.3). Marques da Silva e Silva (2008) observaram que o teor de argila maior, nas regiões mais elevadas, é devido à erosão, que removeu o solo do horizonte A, deixando o horizonte B na superfície. O horizonte B tem maior teor de argila, e esse armazena mais água em anos secos. Porém, maior disponibilidade de água não indica aumento de produtividade. Baixos coeficientes de correlação entre o MDE e produtividade indicam que a relação entre essas variáveis possa ser não linear e que existem outros fatores que podem ter maior relação com produtividade.

O mapa de produtividade da safra de 2009-2010 (MP2010) não apresentou

coeficiente de correlação significativo com os atributos do solo. O MP2011 correlacionou-se com a granulometria do solo. O mapa de produtividade da safra 2012-2013 (MP2013) apresentou correlações com maior número de atributos do solo. Esse fato pode ter ocorrido porque as amostras de solo foram coletadas antes desta safra. Marques da Silva e Silva (2008) comentam que coeficientes de correlação altos, negativos ou positivos, entre um atributo e a produtividade, podem expressar efeito significativo do fator sobre a variabilidade da produtividade. O MDE, CEa, MP2013 e MPClass correlacionaram-se significativamente com 3, 2, 4 e 3, respectivamente, dos dez atributos químicos de solo analisados. Foi observada correlação significativa somente do MP2011 com a granulometria do solo. Isso pode ser explicado pela baixa variabilidade desses atributos no solo.

O mapa do padrão de espacial e estabilidade temporal da produtividade (MPClass) correlacionou-se negativa e significativamente com o atributo referente ao potencial de fertilidade do solo, V, ou seja, quanto maior esse valor, mais nutrientes a planta tem para absorver. Entretanto, os baixos valores de V correlacionaram-se com classes maiores (3 e 4), ou seja, as classes de baixas produtividades. Os atributos CEa, MDE e MPClass correlacionaram-se significativamente entre si, dessa forma, pode-se considerar que essas três variáveis são adequadas para definir zonas de manejo.

4.5.4 Delimitação de Zonas de Manejo

Ao delimitar zonas de manejo em um campo de produção agrícola, geralmente são utilizados atributos chaves como a produtividade, o MDE e a CEa, ou mesmo a combinação de vários atributos, normalmente associados àqueles atributos que se quer manejar. As zonas de manejo podem ser facilmente delimitadas utilizando mapas interpolados e um programa de computador com base no método de classificação não supervisionada Fuzzy c-means. A análise de correlação apresentada na Tabela 4.4 revelou a existência de correlação da CEa, MDE, MPClass e os vários atributos do solo, indicando que parte da variabilidade desses atributos é explicada pela variabilidade da CEa, MDE e MPClass. Estas variáveis podem ser consideradas atributos chaves para estratificação do campo.

Os mapas interpolados da CEa, MDE e MPClass foram submetidos ao classificador Fuzzy C-means, tendo a classificação sido avaliada com número de classes

variando de 2 a 5. Para cada classificação, o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) foram calculados, e o número de classes consideradas para todas as zonas delimitadas foi calculado. Os valores desses dois índices são apresentados na Figura 4.4.

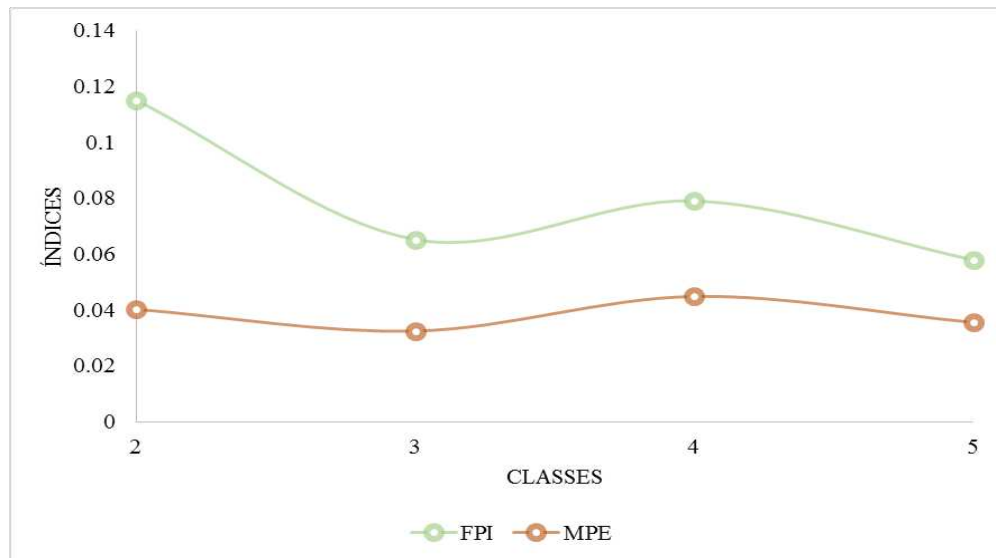


Figura 4.4 - Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia de Partição Modificada (MPE) por zonas de manejo definidas a partir do mapa de padrão espacial e estabilidade temporal (MPClass), CEa (condutividade elétrica aparente do solo), e MDE (modelo digital de elevação),

Verifica-se que os valores mínimos dos dois índices não ocorrem para um mesmo número de classes. Entretanto, observa-se que a utilização de três classes resulta em baixos valores tanto para o FPI como para o MPE, e por isso, esse foi o número de classes estabelecido como ideal. Na Figura 4.5 é apresentado o mapa das zonas de manejo utilizando-se três classes. A zona de manejo resultante apresentou semelhanças ao MPClass (Figura 4.4) evidenciando maior influência dessa variável na delimitação das zonas de manejo.

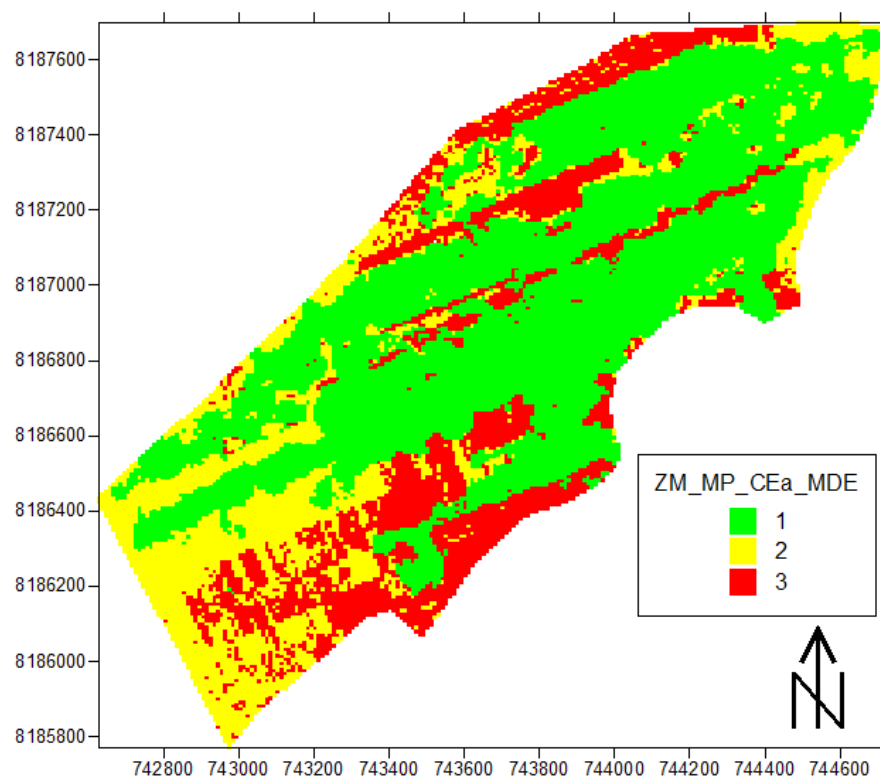


Figura 4.5 - Zonas de manejo definidas a partir do mapa do padrão espacial e estabilidade temporal da produtividade (MPClass), condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e modelo digital de elevação (MDE).

4.5.5 Validação das zonas de manejo

Para validar o mapa das zonas de manejo apresentado na Figura 4.6, foram geradas zonas de manejo para cada atributo do solo utilizando-se também três classes. Foram então calculados os coeficientes Kappa entre o mapa da Figura 4.6 e o mapa das zonas de manejo geradas para cada atributo do solo. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4.5. É possível verificar que as zonas de manejo apresentadas na Figura 4.6 resultou um coeficiente Kappa significativamente diferente de zero para a maioria dos atributos, exceto para Mn. O coeficiente Kappa foi considerado razoável para as variáveis Cu, argila, silte, areia e CE, e bom para o MDE. Para os demais atributos o coeficiente Kappa foi classificado como ruim.

Tabela 4.5 - Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades do solo com as zonas de manejo (ZM) em três classes.

<i>Atributos do Solo</i>	<i>Coeficiente Kappa</i>
Mn (mg.dm ⁻³)	-0,02 ^{ns}
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0,06*
V (%)	0,06*
pH (CaCl ₂)	0,08*
CTC (T) (cmol _c .dm ⁻³)	0,08*
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	0,09*
P (Melich) (mg.dm ⁻³)	0,10*
Na (mg.dm ⁻³)	0,10*
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	0,11*
Zn (mg.dm ⁻³)	0,11*
MP2009(t.ha ⁻¹)	0,12*
MP2011(t.ha ⁻¹)	0,12*
Fe (mg.dm ⁻³)	0,14*
MP2010(t.ha ⁻¹)	0,19*
Cu (mg.dm ⁻³)	0,21*
Silte (%)	0,21*
Areia (%)	0,24*
Argila (%)	0,27*
CEa (mS.m ⁻¹)	0,34*
MP2013(t.ha ⁻¹)	0,36*
MDE (m)	0,41*

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; V – saturação por bases; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; MDE – Modelo digital de elevação; MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; MPClass – mapa de tendência de variabilidade espacial e temporal da produtividade. Obs: NS Não significativo ao nível de 5% de probabilidade;

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores médios de cada atributo do solo em cada zona de manejo apresentada na Figura 4.6. O intervalo de confiança (IC) foi utilizado para comparar as médias. Verifica-se que as classes de manejo 1 e 3 apresentaram diferenças significativas para as médias da granulometria do solo e MDE. Zonas que apresentam médias estatisticamente iguais para um atributo do solo não necessitam ser manejadas de forma diferenciada. Alves et al. (2013) observaram que as zonas de manejo definidas a partir de mapas de condutividade elétrica (ZM1) do solo a 20 cm e de mapas de matéria orgânica do solo (ZM2), detectaram diferenças significativas, pelo teste t, entre as médias dos atributos avaliados das propriedades

físico-químicas do solo e produtividade, em 44% (ZM1) e em 66% (ZM2) destes atributos, respectivamente. Molin e Castro (2008) encontraram diferenças significativas, pelo teste de Tukey, entre as zonas geradas utilizando CEa e atributos do solo para os diversos atributos estudados, evidenciando a proposta de classificação. Entretanto, esse resultado indica que a granulometria e a altitude podem ser o fator limitante da produtividade. A granulometria pode influenciar a quantidade de aplicação de adubação fosfatada e potássica. Regiões mais arenosas podem lixiviar o K, quando aplicados em grandes quantidades na linha de plantio. Solos mais argilosos podem adsorver mais P do que solos arenosos. Regiões com menor elevação podem ter problemas com erosões laminar e perdas por lixiviação dos nutrientes do solo. Os atributos químicos podem não ser os fatores que limitam a produtividade.

Tabela 4.6 - Comparação dos atributos físico-químicos do solo e produtividade entre as classes da zona de manejo delimitada utilizando mapa de tendência espacial e estabilidade temporal da produtividade, condutividade elétrica aparente do solo e modelo digital de elevação.

<i>Variável</i>		<i>Classe de Manejo</i>		
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
pH (CaCl ₂)	Média	5,61 ^a	5,60 ^a	5,57 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,16	0,15	0,14
Ca (cmolc.dm ⁻³)	Média	4,39 ^a	4,62 ^a	3,99 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,89	0,81	0,81
Mg (cmolc.dm ⁻³)	Média	1,39 ^a	1,39 ^a	1,39 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,24	0,25	0,30
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	Média	1,98 ^a	2,06 ^a	2,27 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,50	0,52	0,40
P (Melich) (mg.dm ⁻³)	Média	5,53 ^a	5,81 ^a	2,11 ^a
	Desvio			
	Padrão	4,11	5,14	2,16
Na (mg.dm ⁻³)	Média	2,01 ^a	1,88 ^a	1,67 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,66	0,60	0,52
Cu (mg.dm ⁻³)	Média	0,45 ^a	0,40 ^a	0,29 ^a
	Desvio			
	Padrão	0,28	0,32	0,22
Fe (mg.dm ⁻³)	Média	13,70 ^a	12,13 ^a	9,32 ^a
	Desvio			
	Padrão	10,23	10,56	7,04
Mn (mg.dm ⁻³)	Média	5,69 ^a	5,37 ^a	6,05 ^a
	Desvio			
	Padrão			

	Desvio Padrão	2,85	3,18	3,89
Zn (mg.dm ⁻³)	Média	0,32 ^a	0,25 ^a	0,19 ^a
	Desvio Padrão	0,16	0,13	0,03
CTC (T) (cmolc.dm ⁻³)	Média	7,78 ^a	8,13 ^a	7,85 ^a
	Desvio Padrão	0,85	0,80	1,07
V (%)	Média	74,03 ^a	74,08 ^a	70,14 ^a
	Desvio Padrão	8,09	8,30	8,44
Argila (%)	Média	33,10 ^a	28,80 ^{ab}	26,98 ^b
	Desvio Padrão	6,01	6,28	6,63
Silte (%)	Média	19,85 ^a	17,78 ^{ab}	17,05 ^b
	Desvio Padrão	3,13	3,18	2,96
Areia (%)	Média	47,03 ^a	53,43 ^{ab}	55,96 ^b
	Desvio Padrão	9,03	9,35	9,41
MP2009(t.ha ⁻¹)	Média	10,35 ^a	9,76 ^a	9,73 ^a
	Desvio Padrão	0,94	1,09	1,28
MP2010(t.ha ⁻¹)	Média	3,32 ^a	2,95 ^a	3,11 ^a
	Desvio Padrão	0,29	0,38	0,36
MP2011(t.ha ⁻¹)	Média	10,23 ^a	9,87 ^a	9,88 ^a
	Desvio Padrão	0,50	0,53	0,51
MP2013(t.ha ⁻¹)	Média	3,65 ^a	3,30 ^a	2,66 ^a
	Desvio Padrão	0,29	0,52	0,58
MDE (m)	Média	1052,27 ^a	1055,45 ^{ab}	1039,33 ^b
	Desvio Padrão	6,24	7,91	6,99
CEa (mS.m ⁻¹)	Média	4,03 ^a	3,81 ^a	5,64 ^a
	Desvio Padrão	1,06	1,24	0,57

pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – pH – potencial hidrogeniônico; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez Potencial; Al – alumínio; H – hidrogênio; P – fósforo; Na – sódio; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – zinco; CTC (T)- capacidade de troca catiônica a pH 7; MO – matéria orgânica; V – saturação por bases; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; MDE – Modelo digital de elevação; MP2009 – Mapa de Produtividade da Safra 2008-2009 – Milho; MP2010 – Mapa de Produtividade da Safra 2009-2010 – Soja; MP2011 – Mapa de Produtividade da Safra 2010-2011 – Milho e MP2013 – Mapa de Produtividade da Safra 2012-2013 – Soja; MPClass – Mapa de tendência de variabilidade espacial e temporal da produtividade; ^{a,b} médias seguidas de mesma letra na linha, não diferem pelo teste t.

4.6 CONCLUSÕES

A zona de manejo definida com base no mapa do padrão da variabilidade espacial e estabilidade temporal, condutividade elétrica aparente do solo e modelo digital de elevação não apresentou boa concordância com os atributos do solo.

Não foi identificada diferenças entre a médias de cada classe de manejo para os atributos químicos

A zona de manejo definida apresentou médias diferentes para 2 classes de manejo referente a granulometria do solo e MDE.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, F. J.; AGÜERA, F.; AGUILAR, M. A.; CARVAJAL, F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 7, p. 805–816, 2005.

ALVES, S. M. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.

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

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

BACHMAIER, M.; BACKES, M. Variogram or semivariogram? Understanding the variances in a variogram. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 3, p. 173-175, 2008.

BLACKMORE, S.; GODWIN, R. J.; FOUNTAS, S. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 455-466, 2003.

BLOMGREN, S. A digital elevation model for estimating flooding scenarios at the Falsterbo Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 14, n. 6, p. 579-587, 1999.

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.

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

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.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. D. B.; SILVA, P. C. M.; VASCONSELOS, A. C. F. D. Variabilidade de propriedades químicas do solo aluvial da Ilha de Picos, Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 13-19, 2006.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **American Society of Agronomy**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.

COSTA, M. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; REIS, E. F.; SANTOS, N. T. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395-401, 2014.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900 p.

DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, v. 137, n. 3-4, p. 327-339, 2007.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. In: (Ed.). 2 ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.

FLEMING, K.; HEERMANN, D.; WESTFALL, D. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 6, p. 1581-1587, 2004.

FLORIN, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. **European Journal of Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 212-219, 2009.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GUASTAFERRO, F.; CASTRIGNANÒ, A.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D.; TROCCOLI, A.; CAFARELLI, B. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 600-620, 2010.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; NAGUMO, C. H.; DECHEN, S. C. F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1-14, 2010.

HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 421-422, 1987.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press: 1989. 561pp.

JUERSCHIK, P.; GIEBEL, A. Processing of point data from combine harvesters for precision farming. In: European Conference on Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 297-307, 1999.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 285-308, 2005.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 1, p. 75-83, 2000/1 2000.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Spatial Variability of Soybean Quality Data as a Function of Field Topography. **Crop Science**, v. 42, n. 3, p. 804-815, 2002/5 2002.

KÜHN, J.; BRENNING, A.; WEHRHAN, M.; KOSZINSKI, S.; SOMMER, M. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 490-507, 2009.

KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, Š. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**, 2011.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 174-186, 2007.

LI, Y.; SHI, Z.; WU, C. F.; LI, H. Y.; LI, F. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University SCIENCE B**, v. 9, n. 1, p. 68-76, Jan 2008.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

v. 20, n. 1, p. 1-12, 1996.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1023-1031, 2006.

MARQUES DA SILVA, J. R.; SILVA, L. L. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 2, p. 183-190, 2008.

MCKINION, J. M.; WILLERS, J. L.; JENKINS, J. N. Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 187-198, 2010.

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

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem aplicada**. UFMG. Belo Horizonte: 2007. 297p.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. D. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 567-573, 2008.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 97-107, 2009.

NESI, C. N.; RIBEIRO, A.; BONAT, W. H.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. Verossimilhança na seleção de modelos para predição espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 352-358, 2013.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. D. Relação Solo-Água. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. e NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007.

ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil Pattern Recognition with Fuzzy-c-means: Application to Classification and Soil-Landform Interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 505-516, / 1992.

ORTEGA, R. A.; SANTIBÁÑEZ, O. A. Determination of management zones in corn

(Zea mays L.) based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 58, n. 1, p. 49-59, 2007.

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

ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User's Guide**. Gamma Design Software. Plainwell: 1998. 152p.

RODRIGUES, L. B.; VIEIRA, F. B. P.; AGUSTINI, E. O método húngaro de otimização para o problema da alocação de tarefas **FAMAT em Revista**, n. 4, p. 25-39, 2005.

SCHMIDT, F.; PERSSON, A. Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 179-192, 2003.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; CORWIN, D. L.; DEIANA, R.; BERTI, A.; MORARI, F. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 54-64, 2013.

SILVA JÚNIOR, J. F. D.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 415-424, 2012.

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.

SINGH, P. K.; PARRY, F. A.; PARVEEN, K.; NARAYAN, S.; AMIN, A.; VAIDYA, A. Precision farming and its role in vegetable production. **International Journal of Current Research**, v. 3, n. 4, p. 74-81, 2011.

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 471-487, 2009.

SOUSA JUNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, A. J. M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 449-456, 2008.

SUN, X.-L.; ZHAO, Y.-G.; WANG, H.-L.; YANG, L.; QIN, C.-Z.; ZHU, A. X.; ZHANG, G.-L.; PEI, T.; LI, B.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**, n. 0, 2011.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p.

1366-1376, 2007/9 2007.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, p. 173-179, 2012a.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 683-690, 2012b.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Application of soil physics. In: HILLEL, D. E. (Ed.). **Spatial variability of soil physical properties in the field**. New York: Academic Press, 1980. 385p.

ZHANG, X.; SHI, L.; JIA, X.; SEIELSTAD, G.; HELGASON, C. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 103-114, 2009.

ZHU, A. X.; YANG, L.; LI, B.; QIN, C.; PEI, T.; LIU, B. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. **Geoderma**, v. 155, n. 3-4, p. 164-174, 2010.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. (Livre Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

5 CONCLUSÃO GERAL

Com base nos resultados pode-se concluir que:

- Os padrões espaciais foram identificados, encontrando-se áreas com baixas e altas produtividades.
- No padrão temporal foram encontradas áreas estáveis e instáveis
- Houve homogeneização da variabilidade espacial quando se analisou o resultado combinado de mais de uma safra.
- Foi encontrado alta instabilidade em parte da área em estudo que deve ser manejada de forma distinta.
- Não foi identificado relação entre o mapa do padrão de variabilidade espacial e temporal com os atributos do solo
- A zona de manejo definida com base no mapa do padrão da variabilidade espacial e estabilidade temporal, condutividade elétrica aparente do solo e modelo digital de elevação não apresentou boa concordância com os atributos do solo.
- Não foi identificada diferenças entre a médias de cada classe de manejo para os atributos químicos
- A zona de manejo definida apresentou médias diferentes para 2 classes de manejo referente a granulometria do solo e MDE.

APÊNDICE

6 VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS

São apresentados, na Figura 1, os variogramas experimentais dos modelos teóricos ajustados para semivariância em função da distância h (m) dos atributos do solo e dos mapas de produtividade.

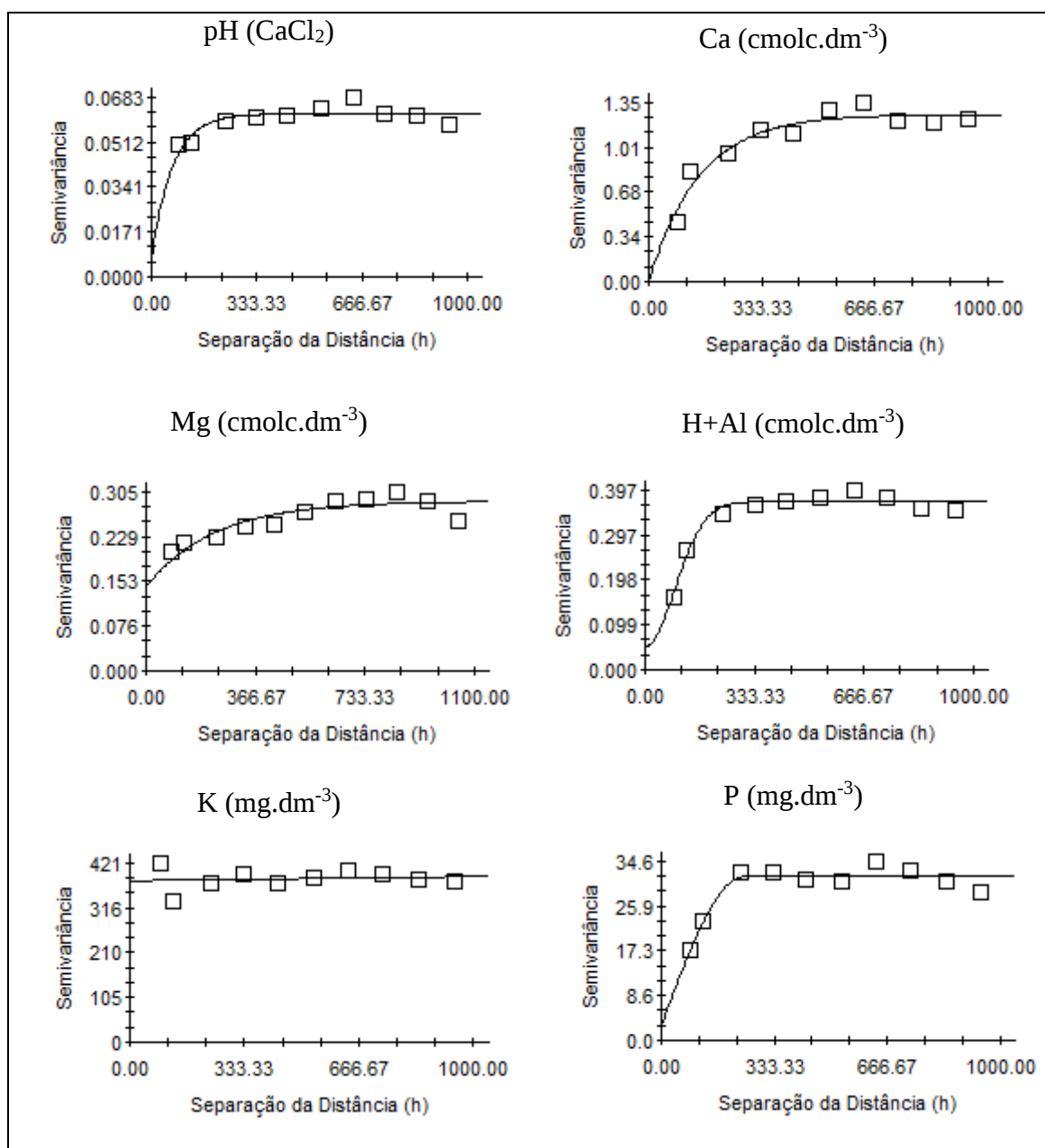


Figura 1 – Variogramas dos modelos teóricos ajustados para semivariância em função da distância de separação (h) em metros, dos atributos do solo e mapas de produtividade.

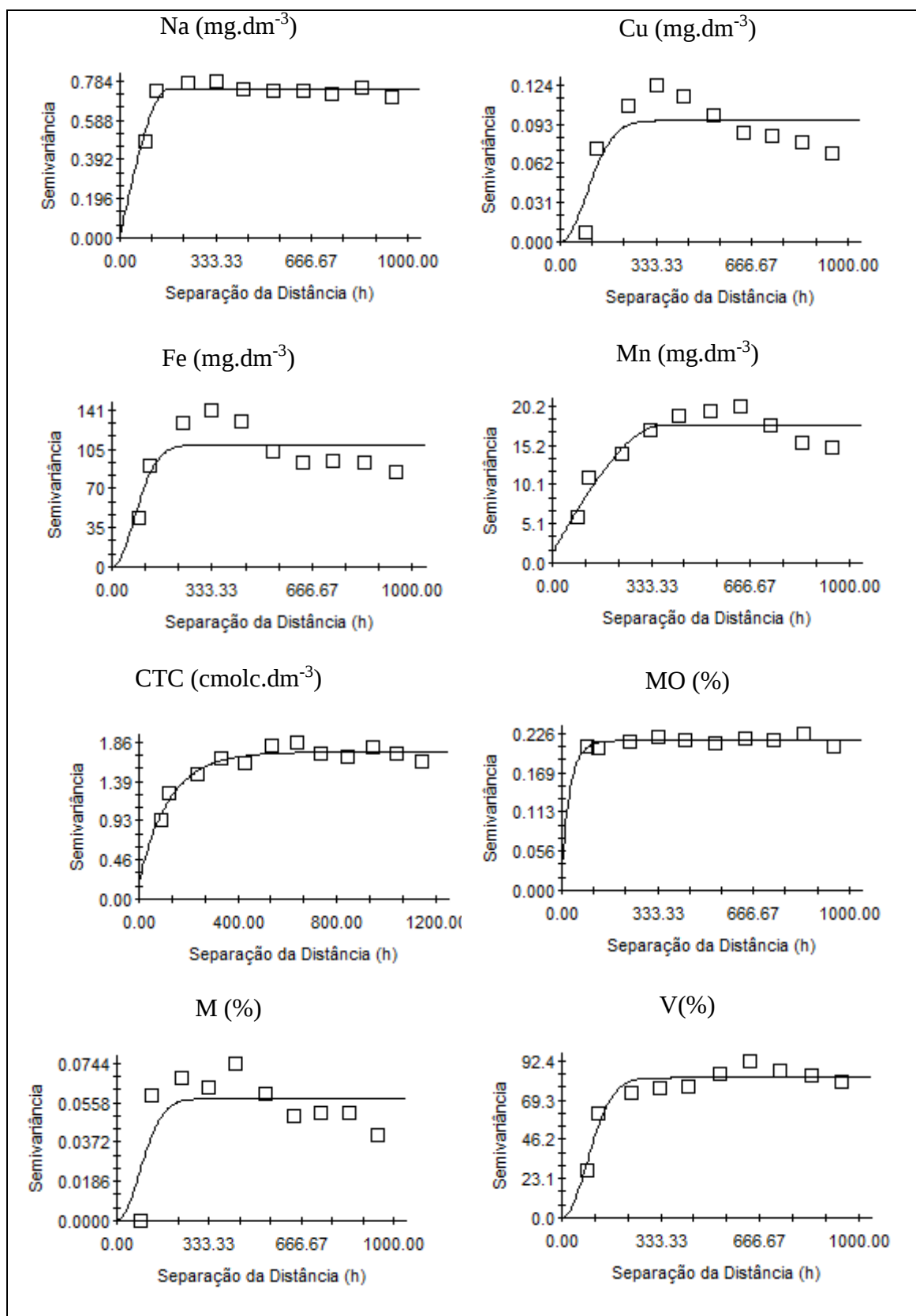


Figura 1 (Continuação) – Variogramas dos modelos teóricos ajustados para semivariância em função da distância de separação (h) em metros, dos atributos do solo e mapas de produtividade.

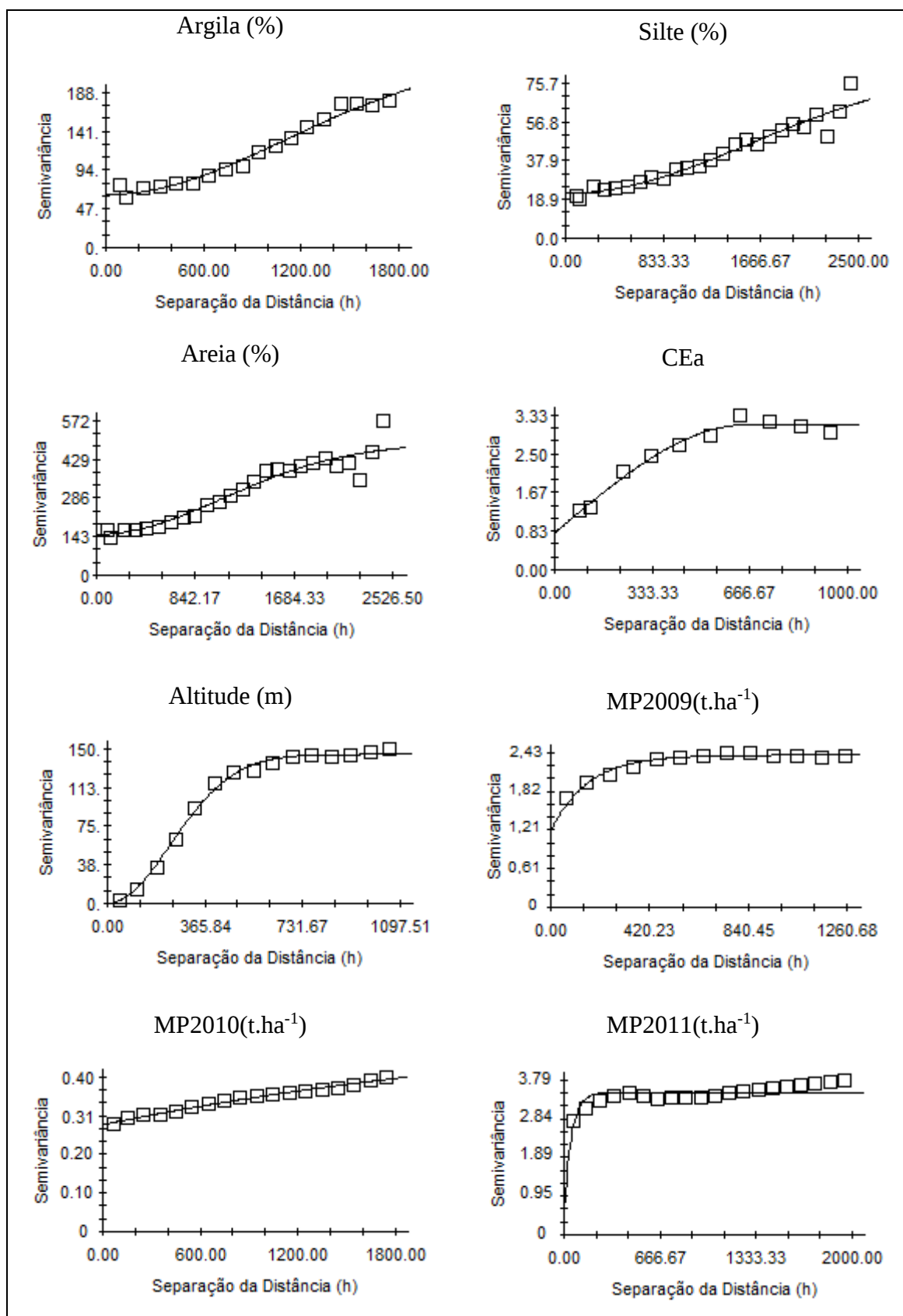


Figura 1 (Continuação) – Variogramas dos modelos teóricos ajustados para semivariância em função da distância de separação (h) em metros, dos atributos do solo e mapas de produtividade.

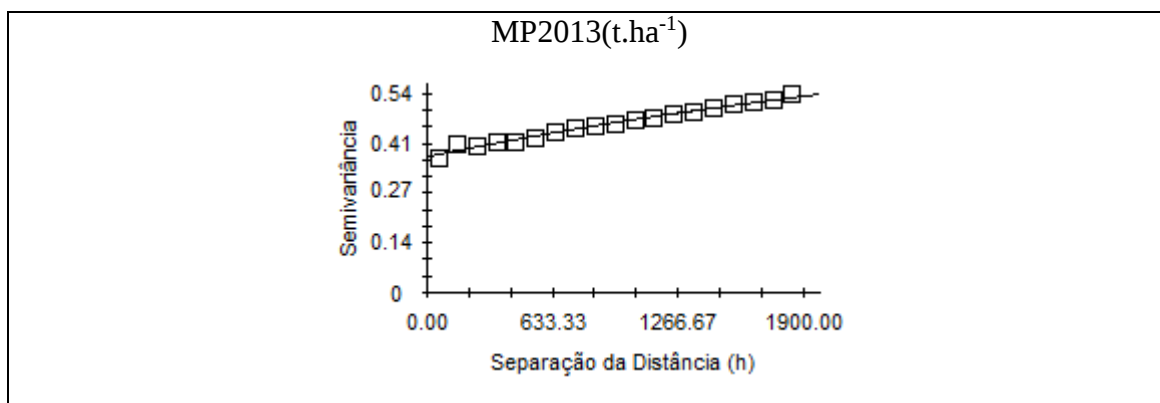


Figura 1 (Continuação) – Variogramas dos modelos teóricos ajustados para semivariância em função da distância de separação (h) em metros, dos atributos do solo e mapas de produtividade.

7 VALIDAÇÃO CRUZADA

São apresentados, na Figura 2, a validação cruzada dos atributos do solo e dos mapas de produtividade.

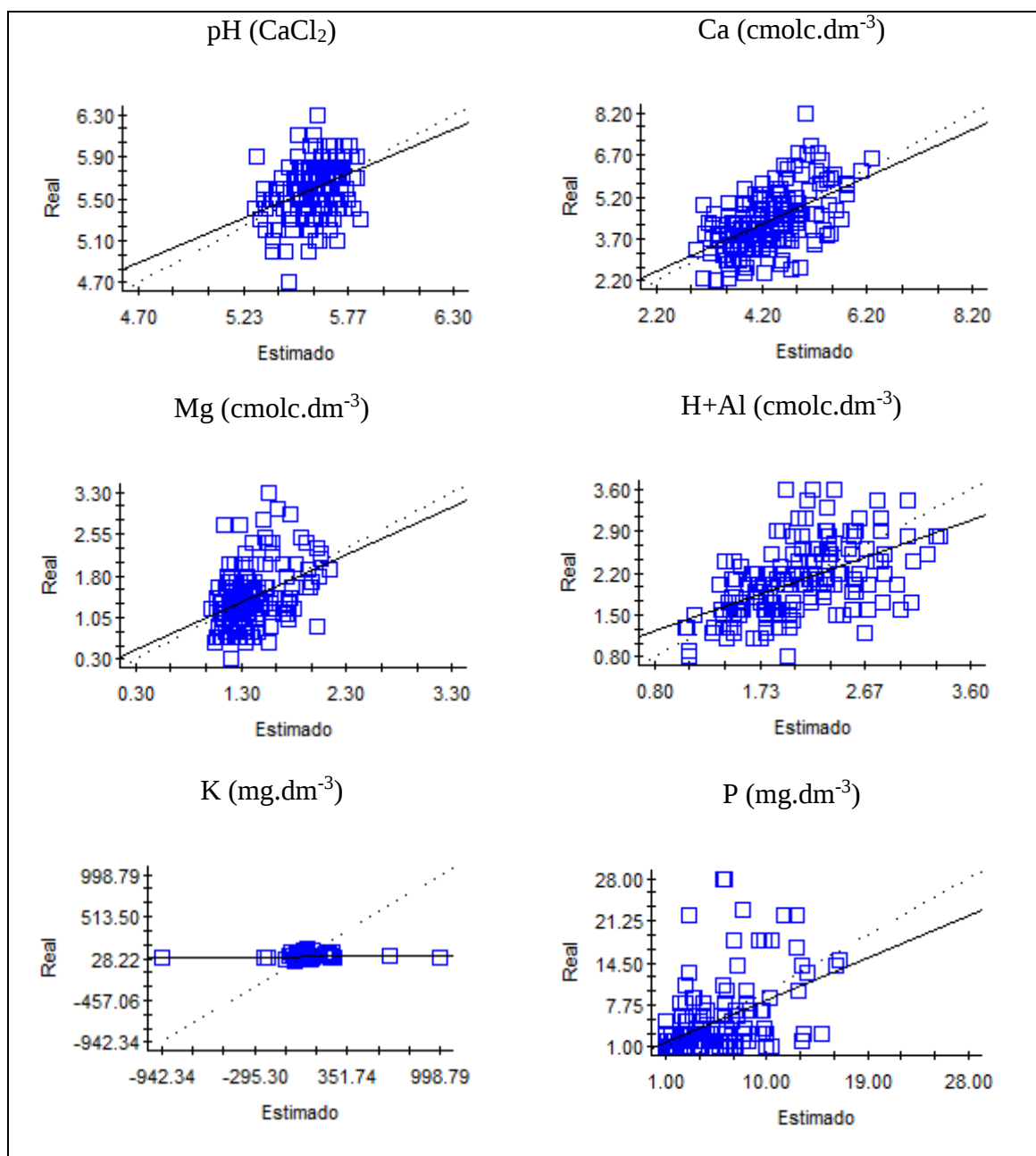


Figura 2 – Validação cruzada dos atributos do solo e mapas de produtividade.

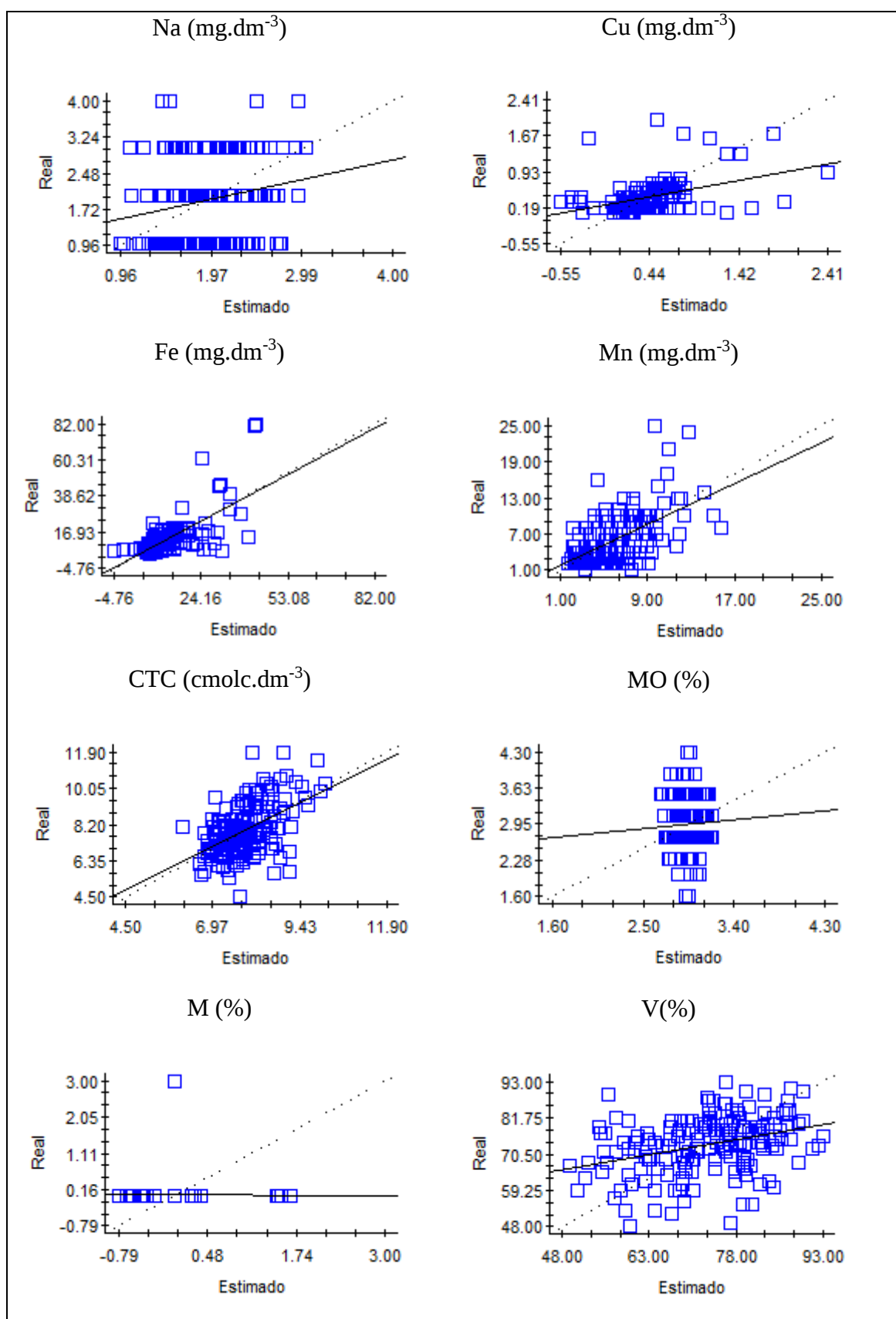


Figura 2 (Continuação) – Validação cruzada dos atributos do solo e mapas de produtividade.

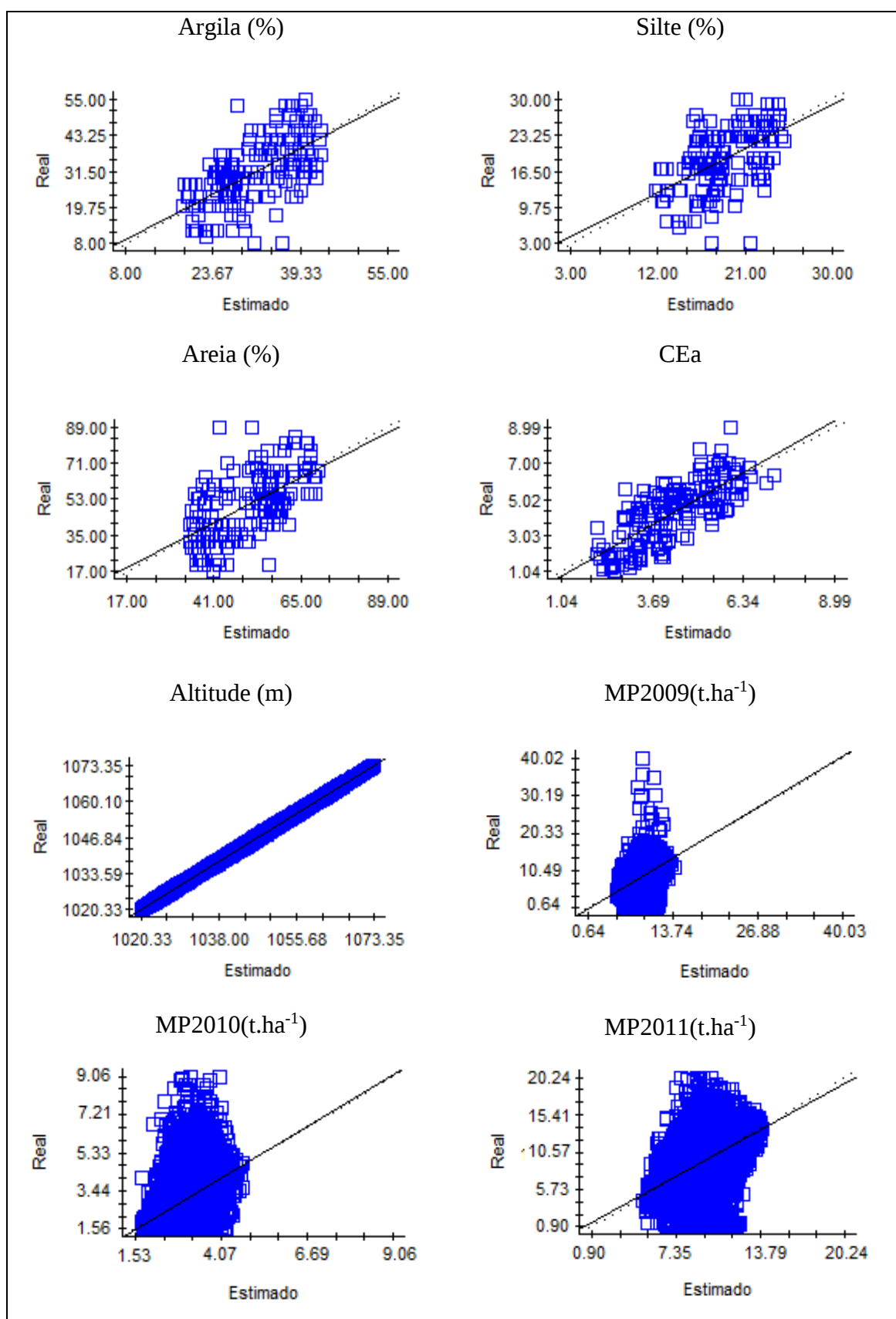


Figura 2 (Continuação) – Validação cruzada dos atributos do solo e mapas de produtividade.

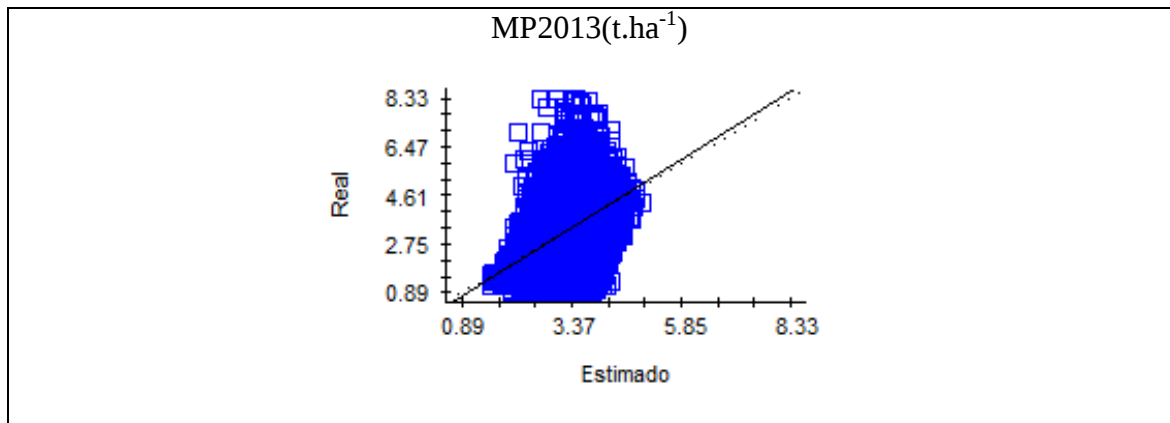


Figura 2 (Continuação) – Validação cruzada dos atributos do solo e mapas de produtividade.