

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RAFAEL SANTOS FARAUN

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES E COMPONENTES PRINCIPAIS ASSOCIADA A
LÓGICA FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM ALGODOEIRO**

CHAPADÃO DO SUL – MS
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RAFAEL SANTOS FARAUN

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES E COMPONENTES PRINCIPAIS ASSOCIADA A
LÓGICA FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM ALGODOEIRO**

Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia, área
de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS
2017



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Campus de Chapadão do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Rafael Santos Faraun

ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Fabio Henrique Rojo Baio

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES E COMPONENTES PRINCIPAIS
ASSOCIADA A LÓGICA FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO
EM ALGODOEIRO**

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Fabio Henrique Rojo Baio

Prof.(a) Dr.(a) Cassiano Garcia Roque

Prof.(a) Dr.(a) Karina Marie Kamimura

Chapadão do Sul, 05 de Abril de 2017.

DEDICATÓRIA

*A Deus por estar sempre me abençoando e guiando meu caminho.
A minha família, pelo carinho e apoio, aos meus amigos que sempre estão
presentes em minha.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu professor e orientador Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio pela oportunidade de trabalharmos juntos, pelas orientações, confiança e por todo conhecimento compartilhado durante todo desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais Sra. Ivone e Sr. Sebastião, e minha irmã Danielle pelo apoio indispensável em todos os momentos.

A todos os professores e funcionários da UFMS que contribuíram para realização de diversas etapas deste trabalho.

LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁGINA
1	Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados de atributos químicos do solo.....	27
2	Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados de atributos físicos do solo.....	28
3	Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados da fenologia do algodoeiro.	29
4	Parâmetros dos semivariogramas, para as componentes principais dos dados físicos e químicos do solo e fenológicos do algodoeiro de maior correlação com a produtividade do algodoeiro.. ..	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Algodão no Brasil	7
2.2 Agricultura de precisão	7
2.3 Análise multivariada	8
2.4 Lógica fuzzy	9
2.5 Zonas de manejo	10
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DE CORRELAÇÕES E COMPONENTES PRINCIPAIS ASSOCIADA A LÓGICA FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM ALGODOEIRO	15
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO	17
2 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O algodão (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) é um produto de extrema importância socioeconômica no Brasil. O país encontra-se entre os maiores produtores desta fibra natural, com lugar privilegiado no cenário mundial.

O algodoeiro é uma planta de ciclo indeterminado, podendo chegar até aos duzentos dias. Na maioria dos sistemas de produção diversos são os fatores que influenciam em sua produção, tais como: as variações de solo, topografia, incidência de pragas e plantas daninhas resultando em diferenças de vários fatores inerentes à cultura relacionados ao crescimento e produtividade, ainda que no mesmo talhão.

Esse fato é bem conhecido, entretanto, as práticas agrícolas tradicionalmente são empregadas de modo uniforme, baseadas em recomendações que seguem uma média para o talhão.

Nas últimas décadas, a agricultura de precisão (AP) tem colaborado para o desenvolvimento de tecnologias para gerenciar a variabilidade espaço-temporal de atributos que interferem na produção, com a finalidade de melhorar a eficiência produtiva e aperfeiçoar o manejo de uso de insumos.

Nas diversas fases da AP, o levantamento de dados é o que fornece suporte para uma boa interpretação da variabilidade espacial. As técnicas de análise multivariadas têm se mostrado uma relevante alternativa na transformação de dados em informações, ajudando nas tomadas de decisões.

Dentre essas técnicas de análise multivariadas para obtenção de componentes principais, temos a geração de zonas de manejo utilizando a lógica fuzzy para detecção de similaridade entre os dados, fornecendo subsídios para a identificação, ou para a correlação das variáveis que afetam a produtividade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Algodão no Brasil

A cultura do algodoeiro tem grande importância econômica no Brasil pela sua multiplicidade. Sua fibra têxtil natural é muito utilizada pelo homem e se caracteriza por ser uma celulose na sua forma pura. A semente é rica em óleo e o bagaço pode ser utilizado para a alimentação animal (CARVALHO, 1996).

No Brasil, o Maranhão foi o primeiro grande produtor desta cultura, depois expandiu para o Nordeste e paralelamente a cultura deslocou-se para região da Bahia e Minas Gerais. Em seguida, a cultura dispersava-se a oeste do São Francisco até Goiás; pelo Nordeste até Piauí; e de São Paulo atingia o Rio Grande do Sul, no Sul do país (FREIRE et al., 1980).

No início da década de 1980, o Brasil era um dos maiores produtores e exportadores mundiais de fibra de algodão. Hoje, é o quinto maior produtor mundial e o terceiro maior exportador de algodão, devido principalmente ao alto grau tecnológico das lavouras. A região Centro-Sul contribui com 72,2% da área plantada no Brasil. Quanto a produção, a estimativa é que em 2017 sejam colhidas 2028 mil toneladas de algodão em caroço (CONAB, 2017).

O cultivo do algodão no Brasil sofreu grandes modificações tecnológicas, criando um novo modelo produtivo, com extensas áreas de plantio e mecanização da lavoura desde o plantio até a colheita. Até o início da década de 90, a produção de algodão no Brasil concentra-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Após esse período, aumentou significativamente a participação do algodão produzido nas áreas de cerrado, basicamente da região Centro-Oeste (AMARAL & SILVA, 2007).

2.2 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão (AP) surgiu a muitos anos, com agricultores que tinham por finalidade maximizar a produção física e econômica das culturas (KELLOG, 1957). Segundo MOLIN (2001), no início a agricultura era familiar, onde cada produtor possuía conhecimento da sua área produtiva, o que permitia o tratamento localizado a suas lavouras, praticando AP, embora de forma empírica e de baixa tecnologia.

A agricultura de precisão baseada no conhecimento da variabilidade espacial e temporal de uma lavoura administra as operações de manejo de forma que os

insumos sejam ajustados localmente, em nível adequado permitindo a uniformidade da produção, minimizando custos de produção e dos impactos ambientais (SALVADOR, 2005).

Através da agricultura de precisão é possível a identificação de zonas de manejo a campo e a geração de mapas de prescrição para as atividades de aplicação localizada de insumos baseada na variabilidade dos fatores de produção (ANTUNIASSI & GADANHA JR, 2000). MANTOVANI (2000) define a AP como uma tecnologia moderna para o manejo do solo, dos insumos e das culturas, de modo adequado considerando as variações espaciais e temporais dos fatores que afetam a produtividade.

Os fundamentos da AP atual surgiram no início do século XX, com o desenvolvimento de microcomputadores, sensores e software (LAMPARELLI, 2013). BALASTREIRE & BAIO (2002) descrevem que avanços na agricultura de precisão foram possíveis devido as técnicas eficiente de geoprocessamento, como o GPS ou GNSS e da utilização de tecnologias como sensoriamento remoto e SIG.

A redução nos custos de produção está relacionada ao fato de que os insumos agrícolas somente serão aplicados em regiões potenciais que realmente necessitam deste. Assim, os sistemas de manejos tradicionais, com ineficiente tratamento da variabilidade de fatores que afetam a produtividade (fertilidade, umidade, pragas e doenças) pela média de extensas áreas de produção, podem dar lugar a técnicas mais econômicas e ecologicamente mais eficientes (ZAMBOLIM et al., 2008).

2.3 Análise multivariada

A estatística multivariada pode ser definida como um conjunto de métodos estatísticos utilizados em situações nas quais diversas variáveis são medidas simultaneamente, em cada elemento amostral. Em geral, as variáveis são correlacionadas entre si e quanto maior o número de variáveis, mais complexa torna-se a análise por métodos comuns de estatística univariada (MINGOTI, 2005).

Para STEVENSON (1971), a análise multivariada é uma ferramenta estatística que processa as informações de modo a simplificar a estrutura dos dados e a sintetizar as informações quando o número de variáveis envolvidas é muito

grande, facilitando o entendimento do relacionamento existente entre as variáveis do processo.

Segundo HAIR JR et al. (2005), não é fácil definir análise multivariada, pois de modo geral, qualquer análise simultânea de mais de duas variáveis, de certo modo pode ser considerada uma análise multivariada. Para ser considerada verdadeiramente uma multivariada, todas as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas de maneira que seus diferentes efeitos não podem ser significativamente interpretados de forma separada.

VICINI (2005) explica que a análise de componentes principais (ACP) é uma técnica matemática da análise multivariada, que possibilita investigações com um grande número de dados disponíveis. Possibilita, também, a identificação das medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados, sem perdas significativas de informações. Além disso, transforma um conjunto original de variáveis em outro: os componentes principais de dimensões equivalentes.

A ACP tem a finalidade de substituir um conjunto de variáveis correlacionadas por um conjunto de novas variáveis não correlacionadas, sendo essas combinações lineares das variáveis iniciais, e colocadas em ordem decrescente por suas variâncias (VERDINELLI 1980). De acordo com REGAZZI (2001), para a determinação das CP, é necessário calcular a matriz de variância-covariância, ou a matriz de correlação, encontrar os autovalores e autovetores, e por fim, escrever as combinações lineares que serão as novas variáveis.

2.4 Lógica fuzzy

O processo de definição de unidades de manejo consiste na determinação da variabilidade espacial dentro da área produtiva, sendo necessário após esse processo realizar o agrupamento de dados, onde pode-se realizar a determinação de zonas ou unidades de manejo, de acordo com a semelhança de tais atributos. Porém torna-se necessário a utilização de um método para realizar o processo de agrupamento desses dados e delimitação das unidades, por exemplo, o método c-means. A lógica fuzzy é baseada nas teorias dos conjuntos fuzzy, difere dos sistemas lógicos tradicionais em suas características e detalhes. Nesta lógica o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo

interpretado como um processo de composição de relações nebulosas (GOMIDE et al., 1995).

A lógica fuzzy tem sido utilizada na agricultura para dar suporte à tomada de decisões e entre essas aplicações pode-se citar o trabalho desenvolvido por SILVA et al. (2010) que utilizaram a lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon com base em atributos químicos do solo.

Modelos fuzzy tem sido utilizados em projetos de sistemas de controles. Algoritmos de agrupamentos fuzzy são ferramentas matemáticas utilizadas para detectar similaridade entre membros de uma coleção de objetos (WINDHAM, 1982; ATECA et al., 2001).

Segundo KATINSKY (1994), a lógica fuzzy pode ser definida como a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado.

2.5 Zonas de manejo

Através da agricultura de precisão é possível a identificação de zonas de manejo a campo e a geração de mapas de prescrição para as atividades de aplicação localizada de insumos baseada na variabilidade dos fatores de produção (ANTUNIASSI & GADANHA JR, 2000).

Segundo KHOSLA et al. (2008) a questão econômica é um empecilho para viabilidade da AP, sendo necessário determinar a variabilidade espacial dos atributos de forma menos onerosa.

A partir disso, averiguar os fatores limitantes, propondo alternativas de manejo diferenciado é ainda bastante recente no Brasil.

Segundo LUCHIARI JR et al. (2000), conceituaram zonas de manejo como sendo áreas do terreno de iguais produção potencial, eficiência do uso de insumos e risco ambientais. Essas regiões são definidas como zonas de manejo, que uma vez delimitadas podem ser tratadas como homogêneas. Neste caso a variabilidade dentro da zona é menor do que entre as zonas.

Portanto, zonas de manejo podem ser consideradas como subáreas, que devem receber tratamento diferenciado, mas que pode ser realizado por meios de sistemas mecanizados utilizados na agricultura convencional (RODRIGUES JR et al., 2011). Neste contexto, zonas de manejo é um alternativa para viabilizar a AP,

tendo como objetivo a redução do número de amostras e não o número de pontos amostrais.

Segundo DOERGE (2000), algumas características locais não variam significativamente ao longo do tempo (topografia, condutividade elétrica, propriedades físicas do solo) e se estiverem relacionadas com o rendimento das culturas, podem ser consideradas, confiáveis para definir as zonas de manejo.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. A. B. do; SILVA, M. T. Zoneamento agrícola do algodão herbáceo (ciclo 170 dias) no Nordeste Brasileiro safra 2007/2008 - Estado da Bahia. Campina Grande: **Embrapa Algodão**, 2007. 7 p. (Comunicado Técnico, 315).
- ANTUNIASSI, U. R.; GADANHA JÚNIOR, C. D. Aplicação localizada de produtos fitossanitários. In: BORÉM, A.; **Agricultura de precisão**. Viçosa - UFV, 2000. p. 181-202.
- ATECA, M. R.; SERENO, R.; APEZTEGUÍA, H. Zonificación de una superficie cultivada con soja según aspectos fenométricos y consumo de agua del suelo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.111-116, 2001.
- BALASTREIRE, L. A.; BAIO, F. H. R. Avaliação do desempenho de um GPS com algoritmo otimizado sem sinal de correção para a agricultura de precisão. In: BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1998-2001**. Piracicaba, p.285-288. 2002.
- CARVALHO, P. P. Manual do Algodoeiro. **Instituto de Investigação Científica Tropical**, 1996. 282p.
- CONAB. Conselho Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, sexto levantamento, março 2017 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2017.
- DOERGE, T.A. Management zone concepts. **Site-specific management guidelines**. 2000. p.4. Disponível na Internet. <http://www.farmresearch.com/SSMG/ssmg-02/SSMG02.pdf> acesso em: 25 Mar. 2017.
- FREIRE, E. C.; MOREIRA, J. A. N.; MEDEIROS, L. C. Contribuição das ciências agrárias para o desenvolvimento: o caso do algodão. **Revista da Economia Rural**, v.18, n.3, p. 383-413, 1980.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. **Proceedings of 6th international Fuzzy Systems Association World Congress – IFSA95**, Tutorials, p.1-38, 1995.
- HAIR JR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.
- KATINSKY, M. **Fuzzy set modelling in Geographical Information Systems**. MSc Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA. 1994.

- KELLOG, C.E. We seek; we learn. In: Stefferud, A. (ed). **The yearbook of agriculture**, 1957: Soil. Washington: U.S. Department of Agriculture e U.S. Government Printing Office.1957, p.1-11.
- KHOSLA, R.; INMANN, D.; WESTFALL, D.G.; REICH, R. M.; FRASIER, M.; MZUKU, M.; KOCH, B.; HORNUNG, A. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.9, n.1, p. 85-100, 2008.
- LAMPARELLI, R. A. C. **Agricultura de Precisão**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_72_711200516719.html>. Acesso em: 10 Mar. 2017.
- LUCHIARI JUNIOR, A.; SHANAHAN, J.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, A.; INAMASU, R.Y.; FRANCA, G.; MANTOVANI, E.; GOMIDE, R. Crop and soil based approaches for site specific nutrient management. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24, 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2000.
- MANTOVANI, E. C. **Agricultura de precisão e sua organização no Brasil**. Agricultura de Precisão. Viçosa, 2000. p.79-92.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão**. O Gerenciamento da Variabilidade, Piracicaba, 2001. 83 p.
- REGAZZI, A. J. INF 766 - **Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p. Apostila de disciplina.
- RODRIGUES JUNIOR, F. A.; VIEIRA, L. B.; QUEIROZ, D. M. de; SANTOS, N. T. **Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar**. *Revista brasileira engenharia agrícola*. [online]. 2011, v.15, n.8, pp.778-787. ISSN 1807-1929.
- SALVADOR, A., **Imagens aéreas multiespectrais na identificação de zonas de manejo em áreas de algodão**. Dissertação Doutorado em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Botucatu, p.138, 2005.

SILVA, M. O.; SANTOS, M. B. G. F.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Aguas salinas , na região de Mossoró (RN), com o uso de análise multivariada. **Ambiência**, v.6, n.2. p.261-270, 2010.

STEVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Habra, 1971.

VERDINELLI, M. A. **Análise inercial em ecologia**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - São Paulo - SP, Universidade de São Paulo - USP, 162p, 1980.

VICINI, L. **Análise Multivariada da Teoria à Prática**. Santa Maria: Biblioteca Central, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 215p.

WINDHAM, M. P. Cluster validity c-means for fuzzy clustering algorithm. IEEE Transactions. **Pattern Analyses Machine Intelligence**, v.4, n.4, p.354-363, 1982.

ZAMBOLIM, L.; CONCEIÇÃO, M. Z.; SANTIAGO, T. **O que os engenheiros agrônomos devem saber para orientar o uso de produtos fitossanitários**. 3. ed. Viçosa: UFV/DFP, 2008. 464p.

CAPÍTULO 1 - Análise de correlações e componentes principais associada a lógica fuzzy para definição de zonas de manejo em algodoeiro.

FARAUN, Rafael Santos. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Análise de correlações e componentes principais associada a lógica fuzzy para definição de zonas de manejo em algodoeiro.

Professor Orientador: Fábio Henrique Rojo Baio.

RESUMO: Uma das alternativas para a delimitação de unidades de manejo pode ser com a utilização da lógica Fuzzy. Nesse sentido, esse trabalho analisa o uso da análise dos componentes principais na identificação de zonas de manejo utilizando a análise fuzzy c-means clustering baseado na variabilidade espacial de dados físicos e químicos do solo e de variáveis fenológicas do algodoeiro, de maior correlação com a produtividade, associada à técnica de geoestatística pelo método de krigagem. Os objetivos foram: (i) identificar os atributos químicos, físicos e fenológicos que possuem maior correlação com a produtividade; (ii) utilizar a análise de componentes principais para identificar quais os atributos físicos, químicos e fenológicos contribuem para a maior variabilidade espacial; (iii) e usar essas variáveis no estabelecimento de zonas de manejo para o algodoeiro via análise fuzzy c-means clustering, associada à técnica de geoestatística pelo método de krigagem. As variáveis que apresentaram maior correlação com a produtividade do algodoeiro foi pH, fósforo, umidade do solo medida aos 39 e 70 dias após emergência (DAE) do algodoeiro, botões florais aos 107 DAE e índice de vegetação (IV) Rededge 53 DAE.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, análise multivariadas, produtividade

CHAPTER 1 - Analysis of correlations and main components associated with fuzzy logic for the definition of management zones in cotton.

FARAUN, Rafael Santos. Federal University of Mato Grosso do Sul. Analysis of correlations and main components associated with fuzzy logic for the definition of management zones in cotton.

Author: Rafael Santos Faraun.

Adviser: Fábio Henrique Rojo Baio.

ABSTRACT: One of the alternatives to determine management zones can be with the use of Fuzzy logic. This work analyzes the use of principal component analysis in identifying the management zones using the fuzzy c-means clustering analysis based on spatial variability of physical and chemical data from soil and phenological variables of cotton crop, in order to obtain higher correlation with productivity, associated with geostatistics technique by kriging method. The objectives were: (i) to identify the chemical, physical and phenological attributes that have the highest correlation with productivity; (ii) use principal component analysis to identify which physical, chemical, and phenological attributes contribute to greater spatial variability; (iii) and to use these variables in the establishment of management zones for the cotton plant through fuzzy c-means clustering analysis, associated to the geostatistics technique using the kriging method. The variables that showed a higher correlation with the cotton yield was pH, phosphorus, soil moisture measured at 39 and 70 days after emergence (DAE) of cotton, flower buds to 107 DAE and the vegetation index (IV) Rededge at 53 DAE.

KEYWORDS: precision agriculture, multivariate analysis, yield.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) destaca-se no cenário agrícola mundial, principalmente pelo seu produto, à fibra de algodão que é utilizada predominantemente por indústrias têxteis e como subprodutos o farelo de algodão e o óleo vegetal. Atualmente, o Brasil é o quinto maior produtor mundial de algodão em caroço, com 4,4 milhões de toneladas produzidas na safra 2013/14 (CONAB, 2015).

O algodoeiro tem rendimento e produtividade aceitáveis quando cultivado em regiões de Cerrados de Altitude, como ocorre na região dos Chapadões. ANSELMO & LEAL (2010) obtiveram produtividades médias, em três anos agrícolas, acima de 4.500 kg ha⁻¹ de algodão em caroço. Em contrapartida seu cultivo demanda grande investimento, aproximadamente R\$ 8.606,46 ha⁻¹ (IMEA, 2017). Assim, para obter lucratividade nessa cultura, torna-se necessária a adoção de técnicas de cultivo e intervenções durante o seu desenvolvimento que minimizem os custos de produção, como técnicas de agricultura de precisão. Entretanto, o algodoeiro representa uma importante alternativa de rotação de culturas e de geração de renda nas principais regiões produtoras do Centro-Oeste.

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para maximizar o lucro dos cotonicultores é a agricultura de precisão, que consiste em uma série de técnicas relacionadas ao manejo realizado de forma precisa, em unidades menores de terra, diferentemente do manejo convencional que considera um campo inteiro como área uniforme. A atividade baseia-se no gerenciamento localizado de sistemas agrícolas, utilizando recursos como mapeamento dos fatores de produção, ferramentas de suporte a decisão e aplicação localizada de insumos. Em termos econômicos, a utilização desta tecnologia possibilita a priorização de investimentos em áreas onde o potencial de produção seja mais efetivo, garantindo maior retorno econômico (AMARAL et al., 2015). Do ponto de vista ambiental a racionalização e a redução do uso de insumos devem ser avaliadas como um dos principais benefícios da agricultura de precisão.

CERRI & MAGALHÃES (2012) relatam que o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo são importante para definir as práticas agronômicas a serem adotadas no algodoeiro desde que a produtividade se relacione com os atributos químicos, como acidez e disponibilidade de nutrientes, e físicas, como granulometria e escassez ou excesso de água. Para AMADO et al. (2009), o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo e da cultura é uma ferramenta significativa para analisar a

variabilidade da produtividade e aperfeiçoar o manejo em áreas agrícolas, por meio de um gerenciamento agrícola que leve em consideração informações pontuais de solo e das culturas.

Todavia, existem um grande número de variáveis oriundas da avaliação de atributos físicos, químicos e morfológicos. De acordo com FIDALSKI et al. (2007), essas variáveis são comumente por meio de análises estatísticas univariadas, o que pode comprometer as interpretações e as conclusões destas pesquisas, por não ser explorada a existência da dependência entre as variáveis analisadas. A interação destes atributos pode ser estudada pelos métodos estatísticos multivariados, que permitem o agrupamento dos pontos com características similares e permitem a obtenção de um melhor entendimento das variações dos processos que ocorrem no solo.

Dentre as técnicas multivariadas disponíveis, a análise de componentes principais (ACP) pode ser aplicada de forma satisfatória, pois não requer o uso de repetições e possibilita reduzir um grande número de variáveis em combinações lineares, denominadas componentes principais. Cada componente principal é estimado de forma que o primeiro (CP1) retém a maior fração da variabilidade, o segundo (CP2) a segunda maior e assim sucessivamente. Além disto, o método possibilita julgar a importância das variáveis avaliadas para cada componente, ou seja, aquelas que apresentam maior peso e são mais importantes do ponto de vista estatístico (HAIR JR. et al., 2009; MARTIN et al., 2013).

Com o auxílio das técnicas de agricultura de precisão é possível estabelecer zonas de manejo para o algodoeiro e utilizar tratos culturais específicos em cada zona, aumentando de forma eficaz a rentabilidade. Uma das alternativas para a delimitação de unidades de manejo pode ser com a utilização da lógica Fuzzy. O programa *Management Zones Analyst* (MZA), através da lógica Fuzzy, fornece uma série de procedimentos para delineamento de unidades de manejo a partir de uma análise de resultados. O MZA utiliza a agregação de dados de solos e culturas como base para a definição de zonas de manejo agrupando os dados em clusters com base na similaridade de interação entre dados de solo e de culturas (FRAISSE et al., 2001). O número de zonas de gerenciamento pode ser escolhido com base no desempenho de fuzziness Índice (ODEH et al., 1992) e/ou entropia de classificação normalizada (BEZDEK, 1981). Todavia, a literatura é carente de técnicas pelas quais determinam que parâmetros da relação solo-água-plantas são mais adequados para a análise pelo MZA.

Em face ao exposto, esse trabalho teve como objetivos (i) identificar os atributos químicos, físicos e fenológicos que possuem maior correlação com a produtividade; (ii) utilizar a análise de componentes principais para identificar quais os atributos físicos,

químicos e fenológicos contribuem para a maior variabilidade espacial; (iii) e usar essas variáveis no estabelecimento de zonas de manejo para o algodoeiro via análise fuzzy c-means clustering, associada à técnica de geoestatística pelo método de krigagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma lavoura de algodoeiro na região dos Chapadões, em um talhão de 92 ha na Fazenda Amambaí, no município de Chapadão do Céu-GO, no ano agrícola 2014/15. As coordenadas geográficas aproximadas correspondentes são: 52°37'17.79"O e 18°21'21.40"S.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006). A precipitação anual média é de 2.196 mm e temperatura média de 22,5°C, respectivamente. O clima da região é caracterizado de acordo com a classificação Köppen, como clima tropical com estação seca no inverno. Sua altitude média é de 815 m, com relevo predominantemente suave de inclinação entre 1 e 2%.

A semeadura foi realizada no dia 10 de janeiro de 2015, sem segundo cultivo, tendo como cultura anterior o feijoeiro. O cultivar utilizado foi FM 975WS com espaçamento entre linha de 0,80 m e uma população de cem mil plantas por hectare. A adubação de base foi realizada de acordo com a análise de solo, seguindo as recomendações para o cultivo no cerrado (FREIRE, 2015). A adubação realizada foi de 15 kg ha⁻¹ de Nitrogênio, 81 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio, 90 kg ha⁻¹ de K₂O aplicado a lanço e 22 kg ha⁻¹ de Nitrogênio em cobertura. Os tratamentos fitossanitários e aplicações de insumos agrícolas durante o desenvolvimento da cultura foram realizados pelo monitoramento e padrões para controle de pragas e doença da região (FREIRE, 2015).

Os pontos amostrais foram distribuídos aleatoriamente sobre o talhão de algodoeiro aos 23 DAE (dias após emergência), correspondente ao estágio fenológico V5 (quinta folha verdadeira), segundo classificação proposta por MARUR & RUANO (2001). Alocaram-se trinta pontos no talhão, conforme metodologia descrita por SALVADOR & ANTUNIASSI (2011). Os pontos foram distribuídos aleatoriamente e com distâncias amostrais variadas. Em cada ponto amostral foram mensurados os índices fenológicos de cinco plantas de forma a representar a variabilidade local pela sua média. Essas plantas foram marcadas de forma a identifica-las para as amostragens seguintes. A navegação até os pontos de amostrais foi possível com a utilização do GNSS Trimble Nomad (Sunnyvale, EUA), utilizando o programa de amostragem a campo Farm Works Mobile da mesma empresa.

A avaliação estatística foi realizada sobre os resultados das diversas mensurações sobre os trinta pontos amostrais em campo. O delineamento experimental foi o em blocos casualizados, representado pelos trinta pontos com cinco repetições em cada ponto. Aos 26 DAE, foram retiradas dez sub-amostras aleatórias ao redor de cada ponto da grade amostral descrita anteriormente para as avaliações químicas, perfazendo-se uma amostra composta, na profundidade de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Determinou-se o pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), saturação de bases (V%), relação cálcio e magnésio (Ca/Mg), capacidade de troca catiônica (CTC), potássio (K), alumínio (Al³⁺) e fósforo (P).

Já para as análises físicas, aos 39 DAE foram coletadas amostras indeformadas pelo uso de anel volumétrico em cada ponto da grade aleatória, nas profundidades 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m. Com os valores determinados em cada estrato da profundidade, calculou-se as médias 0,0-0,4 m. Foram determinados em laboratório: porosidade total (PT), densidade do solo (DS), umidade do solo (US), resistência mecânica do solo à penetração (RP), teor de argila (TA), macro e microporos.

Para a análise fenológicas, as variáveis mensuradas em campo, em cada ponto de amostragem foram: altura de plantas, número de maçãs, número de capulhos, porcentagem de abertura e índice de vegetação (IV). A altura de cada planta foi medida no caule principal entre a superfície do solo até o ponto de inserção da última folha totalmente expandida. O número total de maçãs e capulhos foi obtido pela contagem de todas as maçãs e capulhos viáveis presentes nas plantas amostradas e o resultado expresso em número de maçãs e capulho por planta. A porcentagem de abertura foi obtida pela média da divisão do valor total de capulhos, abertos pela soma de maçãs e capulhos de cada planta, conforme a Equação 1.

$$\% \text{Abertura} = \text{N}^\circ \text{Capulhos} \div (\text{N}^\circ \text{Capulhos} + \text{N}^\circ \text{Maçãs}) \quad 1$$

O sensor multiespectral ativo utilizado para a coleta de dados do IV foi o N-Sensor ALS (Yara International ASA, Duermen, Alemanha). Sendo um sensor óptico ativo de dossel, emitindo sua própria fonte de luz e com leituras espectrais nos comprimentos de onda da borda do vermelho e infravermelho próximo 730 nm e 760 nm, respectivamente (JENSEN, 1949; OERKE et al., 2010). A classificação das células interpoladas em três classes foi possível pelo método dos quartis dos valores dos índices de vegetação. A função principal desse sensor é detectar a diferença de reflectância possibilitando a inferência sobre a taxa fotossintética por um IV, conforme a Equação 2 (PORTZ et al., 2012).

$$IV \text{ Rededge} = (\ln \rho_{760} - \ln \rho_{730}) * 100 \quad 2$$

Onde:

IV = índice de vegetação; \ln = logaritmo natural; ρ = reflectância no respectivo comprimento de onda.

O N-Sensor foi montado no topo da cabine de um pulverizador autopropelido John Deere modelo 4730 (Catalão, Brasil), a altura de 3,10 m do solo. A faixa escaneada pelo sensor tem largura média de 3 m ao longo do deslocamento da máquina. As passadas ocorreram em uma largura de 30 m. O escaneamento do talhão para a obtenção do IV foi realizado aos 23, 35, 53, 91 e 168 DAE, em diferentes estádios fenológicos da cultura do algodoeiro.

A colheita foi realizada pela colhedora de algodão modelo John Deere 7760 (DesMoines, EUA), sendo determinada a variabilidade da produtividade na área por meio de um sistema de monitoramento de colheita GreenStar Harvest Doc da mesma empresa. No final do ciclo foram avaliados os dados de produtividade do algodoeiro, sendo esses obtidos na colheita realizada com máquina contendo sensores de rendimento com dados georreferenciados. Os dados brutos das produtividades pontuais foram filtrados com base em sua variância, sendo determinados os limites de corte superior e inferior de acordo com metodologia sugerida por TUKEY (1977). Após a interpolação pela metodologia da krigagem, a informação da produtividade pontual correlacionada com os outros componentes foi obtida pela média dos pontos obtidos em um raio de 10 m do ponto amostral de controle.

Primeiramente, foram estimadas as correlações de Pearson entre os atributos químicos, físicos e fenológicos com a produtividade. Devido ao grande número de variáveis em cada classe, foi utilizada a rede de correlações para expressar graficamente os resultados, em que a proximidade entre os nós (traços) é proporcional ao valor absoluto da correlação entre esses nós. A espessura das bordas foi controlada pela estimativa das correlações, onde correlações positivas foram destacadas na cor verde, enquanto as negativas foram representadas em vermelho. Essa análise foi realizada com programa livre RBio (BHERING, 2017).

A análise dos componentes principais (ACP) foi aplicada ao grupo de atributos químicos, físicos e fenológicos de forma separada. Adicionalmente, a produtividade foi inserida em cada um dos grupos para estimar as combinações lineares. Para a aplicação desta análise os dados foram padronizados para evitar interferência da escala de mensuração de cada variável. A ACP foi processada no programa STATISTICA[®] versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

Após identificar os atributos que possuem maior correlação com a produtividade e maior contribuição para o CP1, foi utilizado o programa MZA - *Management Zone Analyst*

(FRIDGEN et al., 2004), para definição das zonas de manejo, utilizando os seguintes parâmetros: Expoente Fuzzy 1,3; Medidas de similaridades Mahalanobis para análises realizadas de forma combinada (mais de um atributo); Número máximo de interações 300 e critério de convergência 0,0001. Baseando-se nos índices do programa MZA, índice de performance Fuzzy (FPI) e entropia de classificação da imagem (ICE), onde ICE com valores maiores indicam o grau de desorganização influenciado por um determinado número de classes e para o FPI valores maiores significam um baixo grau ou nível de separação para as diferentes classes. Foram utilizados como número mínimos de zonas de manejo duas (1 e 2) e número máximo de quatro zonas de manejo diferenciado (1, 2, 3 e 4).

A representação de cada ponto amostral foi obtida por uma média simples das leituras dos atributos fenológicos de cinco plantas ao redor do ponto georreferenciado. Foi aplicado o teste de homogeneidade e as médias das classes foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) pelo programa Sisvar. Foram desenvolvidos os modelos teóricos dos semivariogramas experimentais pela utilização do programa GS+. A interpolação dos mapas por krigagem foi realizada pela extensão Geoestatistical Tools, do programa ArcGis/ArcMap 10.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correlação entre os atributos e a produtividade

As correlações lineares entre os atributos químicos do solo e a produtividade (PROD) estão apresentadas na Figura 1. Observa-se que as maiores correlações encontrados foram entre as variáveis de Ca e Ca/Mg ($r=0,8786$), sendo que Ca e CTC, Mg e Ca/Mg, CTC e Ca/Mg também apresentaram correlações maiores que 0,80. Segundo a SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA (2004), níveis altos e muito altos de Ca, Mg e K e suas relações, possuem forte relação com a produtividade das culturas.

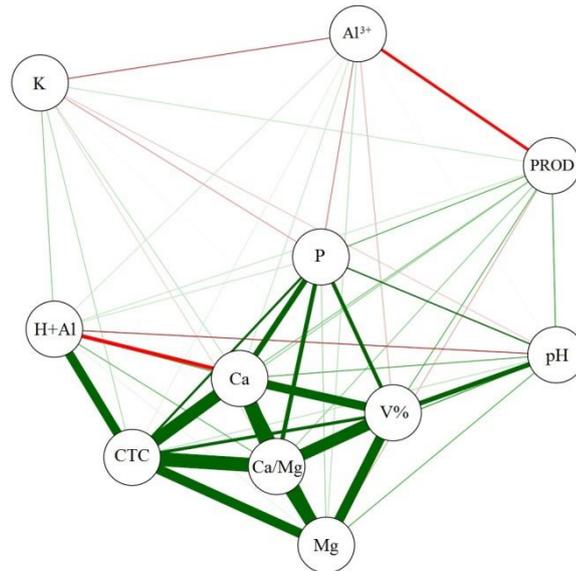


FIGURA 1. Rede de correlações de Pearson entre os atributos químicos e a produtividade (PROD).

**PROD: produtividade; Al³⁺: Alumínio; pH: potencial hidrogeniônico; V%: porcentagem de saturação por bases; P: Fósforo; Mg: Magnésio; Ca/Mg: relação Cálcio e Magnésio; Ca: Cálcio; CTC: Capacidade de Troca Catiônica; H+Al: acidez potencial; K: Potássio.

ANDREOTTI et al. (2000) explicam que a elevação da saturação de bases e os aumentos dos teores de Ca e Mg no solo reduzem a absorção de K, por existir uma inibição competitiva entre esses elementos químicos na fase de absorção. Em um estudo realizado por CARVALHO et al. (2005), os solos da região do cerrado, possuem baixa quantidade de K, sendo que o algodoeiro é muito exigente desse elemento, durante seu ciclo cerca de 63 kg de K₂O são necessários para produção de uma tonelada de algodão em caroço. Essa forte relação dos elementos deve-se principalmente ao manejo adotado na área de cultivo. Provavelmente, devido ao histórico de vários anos de agricultura de precisão e cultivo mínimo, rotação de cultura e correções químicas do solo, provocando um aporte de Ca e Mg.

A variável química do solo que apresentou maior correlação (negativa) com a produtividade do algodoeiro foi Al³⁺, o que já esperado, pois o mesmo em altas concentrações inibe o desenvolvimento das plantas, sendo muito comum nos solos do cerrado. SILVA et al. (1997) verificaram maior proliferação as raízes, em condições adequadas de correção de solo. Embora a correlação observada entre pH e o P com a produtividade seja de baixa magnitude, esses foram os atributos químicos que estão mais próximos da PROD na rede de correlações e devem ser considerados para se obter altas produtividades. Com base nos resultados, observa-

se que os valores de pH do solo esta ligado ao P, pois ambos estão relacionado ao desenvolvimento radicular. O fósforo é importante para o florescimento, desenvolvimento de fruto e maturação dos capulhos. Em experimento anterior dos mesmos autores, verificou-se que em solos com teores médios e altos desse nutriente, não há necessidade de aplicar doses elevadas, portanto, sugere-se a aplicação de 60 a 80 kg ha⁻¹ é suficiente para manter a fertilidade do solo e o potencial produtivo do algodoeiro (FREIRE, 2015).

As correlações lineares entre os atributos físicos do solo e a produtividade estão apresentados na Figura 2. Observa-se que as maiores correlações encontradas foram entre as variáveis de umidade do solo aos 107 DAE e teor de argila ($r=0,9030$), sendo que porosidade total de 0,0-40 cm e microporosidade de 0,0-40 cm também apresentaram correlações maiores que 0,80. Esses atributos estão correlacionados entre si, formando um grupo na fração central da rede de correlações.

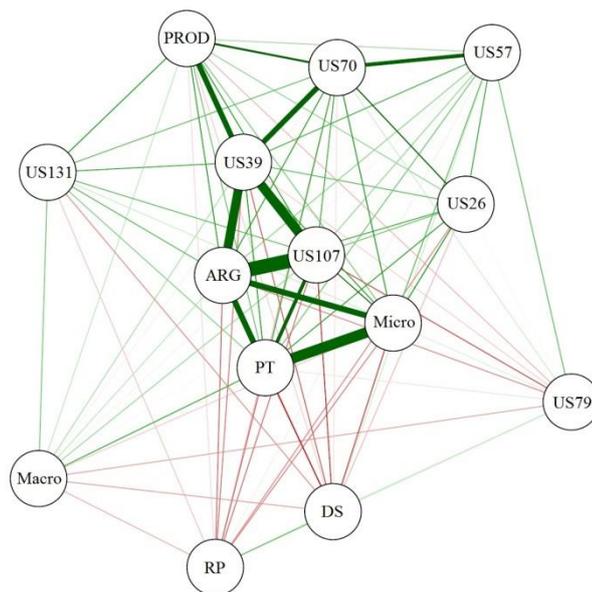


FIGURA 2. Rede de correlações de Pearson entre os atributos físicos e a produtividade (PROD).

**PROD: produtividade; PT: porosidade total; DS: densidade do solo; US_AAA: umidade do solo aos AAA DAE; RP: resistência a penetração; ARG: Teor de argila; Macro: macroporos de 0,0-0,4 m; Micro: microporos de 0,0-0,40 m.

Os atributos físicos do solo que apresentaram maior correlação com a PROD do algodoeiro foi umidade do solo medida aos 39 DAE e, em menor magnitude, 70 DAE do algodoeiro. Em excesso, o fator umidade do solo faz com que as plantas aumentem o ciclo estimulando o crescimento vegetativo e prejudicando o desenvolvimento reprodutivo. Para VIEIRA et al. (2010) em anos com precipitação em excesso ou de estiagem tendem a

intensificar a variabilidade da produtividade. Segundo COSTA et al. (2006), o transporte de fósforo é dependente da umidade do solo, contribuindo para a resposta do fósforo também ser um dos atributos de maior correlação com a produtividade. SILVA et al. (1990) observaram que a disponibilidade de P resultou em maior número de capulho, conseqüentemente maior produção.

As correlações lineares entre as variáveis fenológicas do algodoeiro com a PROD estão apresentadas na Figura 3. A maior correlação observada foi entre IV Rededge 23 DAE e IV Rededge 35 DAE do algodoeiro ($r=0,8405$). A variável fenológica das plantas de algodoeiro que apresentou maior correlação com a produtividade foi botões florais aos 107 DAE.

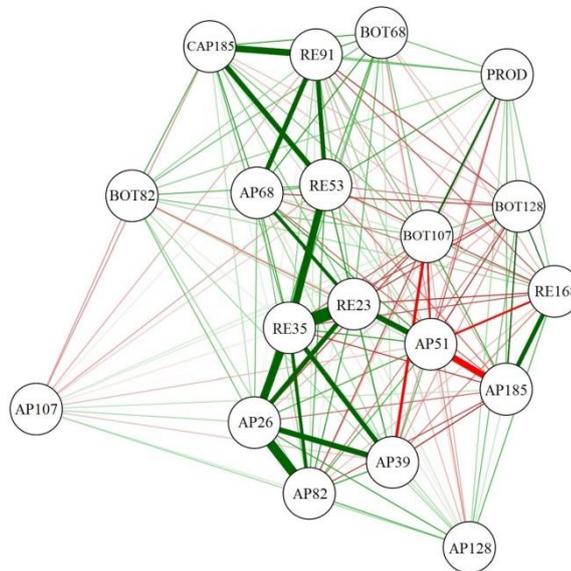


FIGURA 3. Rede de correlações de Pearson entre as variáveis fenológicas e a produtividade (PROD).

**PROD: produtividade; AP_AAA: altura das plantas aos AAA DAE; BOT_BBB: número de botões florais aos BBB DAE; CAP185: número de capulho aos 185 DAE; RE_DDD: índice de vegetação aos DDD DAE.

COSTA et al. (2006), em estudos sobre umidade do solo e difusão do P, mostraram que o maior nível de água no solo, resultou em maior fluxo difusivo do elemento. Ou seja, a umidade do solo no início da fase reprodutiva é de extrema importância. O adequado suprimento hídrico e disponibilidade de P no solo beneficiam a produtividade do algodoeiro principalmente por aumentar a retenção de botões florais (SILVA et al., 1990; NUTTI et al., 2006). Em linha com a maior correlação com a produtividade verificada, BOT 107DAE, fase

de maior floração e pegamento das estruturas reprodutivas do algodoeiro. Após os 80 DAE o algodoeiro absorve quantidades significativas de P.

Portanto, a partir da análise de correlações foram identificados os seguintes atributos que possuem relação direta com a produtividade do algodoeiro: Al^{3+} , umidade do solo medida aos 39 e botões florais aos 107 dias após a emergência. Esses atributos serão utilizados em conjunto com aqueles identificados pela ACP no estabelecimento das zonas de manejo nesta cultura. Também é importante destacar a facilidade com que as correlações lineares podem ser interpretadas com a utilização da técnica gráfica de rede de correlações.

Análise de componentes principais

O primeiro componente principal (CP1) reteve 39.12% da variabilidade total entre os atributos químicos do solo e a produtividade, enquanto o segundo componente captou 17.17% desta variação. Estes dois componentes acumularam 56,29% da variabilidade total. Segundo MINGOTI (2005), normalmente são utilizados os componentes principais que representam mais que 80% da variabilidade acumulada para a plotagem em um gráfico bi ou tridimensional. Contudo, a utilização dessa técnica neste trabalho foi com o objetivo de identificar qual atributo contribuiu com o maior peso no CP1, ou seja, o atributo mais responsável pela variabilidade observada. Na análise de componentes principais das variáveis químicas do solo, o Ca/Mg foi a variável que apresentou maior carga fatorial na componente principal 1, seguido pelas variáveis Ca e CTC (Tabela 1). A variável química do solo de maior contribuição no componente principal 2 foi o H+Al, seguido do pH e V%, sendo que o pH foi uma das variáveis que apresentou maior correlação com a produtividade do algodão.

TABELA 1. Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados de atributos químicos do solo.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Autovalor	4,30	1,89	1,58	1,08	0,75
Variabilidade (%)	39,12	17,17	14,32	9,83	6,80
% cumulada	39,12	56,29	70,61	80,44	87,24
Variáveis	Contribuições nos componentes principais				
Produtividade	0,012	0,041	0,317	0,044	0,028
pH	0,037	0,195	0,000	0,024	0,375
Ca	0,190	0,011	0,000	0,003	0,004
Mg	0,144	0,001	0,088	0,079	0,031
H+Al	0,008	0,408	0,054	0,060	0,016
V%	0,145	0,136	0,010	0,046	0,010
Ca/Mg	0,224	0,003	0,005	0,005	0,005
CTC	0,169	0,130	0,003	0,002	0,000
K	0,000	0,025	0,126	0,458	0,208
Al ³⁺	0,000	0,028	0,348	0,065	0,299
P	0,070	0,024	0,049	0,213	0,024

**Al³⁺: Alumínio; pH: potencial hidrogeniônico; V%: porcentagem de saturação por bases; P: Fósforo; Mg: Magnésio; Ca/Mg: relação Cálcio e Magnésio; Ca: Cálcio; CTC: Capacidade de Troca Catiônica; H+Al: acidez potencial; K: Potássio.

Quando a ACP foi aplicada aos dados dos atributos físicos e produtividade, o CP1 foi responsável por 42,00% da variação observada, enquanto o CP2 por 14,82%. Estes dois componentes acumularam 56,82% da variabilidade observada entre os atributos físicos e produtividade. E dentre estes, a argila foi a variável que apresentou maior carga fatorial na componente principal 1, seguido pelas variáveis umidade do solo 39 DAE (Tabela 2). A variável física do solo de maior contribuição no componente principal 2 foi a umidade do solo 57 DAE, seguido da umidade do solo 79 DAE, sendo que o umidade do solo 39 DAE foi uma das variáveis que apresentou maior correlação com a produtividade do algodão ($r=0,69$).

TABELA 2. Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados de atributos físicos do solo.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Autovalor	5,88	2,07	1,52	1,12	0,92
Variabilidade (%)	42,00	14,82	10,85	7,97	6,58
% cumulada	42,00	56,82	67,67	75,64	82,22
Variáveis	Contribuições nos componentes principais				
Produtividade	0,071	0,000	0,239	0,028	0,003
PT	0,117	0,004	0,052	0,084	0,022
DS	0,047	0,099	0,091	0,021	0,152
US26	0,060	0,081	0,062	0,004	0,108
US39	0,130	0,000	0,043	0,003	0,008
US57	0,033	0,258	0,002	0,028	0,053
US70	0,094	0,118	0,039	0,001	0,005
US79	0,004	0,186	0,001	0,287	0,229
US107	0,126	0,036	0,000	0,052	0,001
US131	0,036	0,030	0,241	0,078	0,096
RP	0,031	0,035	0,092	0,016	0,005
ARG	0,138	0,012	0,002	0,036	0,006
Macro	0,010	0,117	0,017	0,356	0,282
Micro	0,103	0,024	0,118	0,004	0,032

**PT: porosidade total de 0,0-0,4 ml; DS: densidade do solo; US_AAA: umidade do solo aos AAA DAE; RP: resistência a penetração; ARG: Teor de argila; Macro: macroporos de 0,0-0,4 m; Micro: microporos de 0,0-0,40 m.

Os cinco primeiros componentes principais explicaram 73,94% da variância total dos atributos físicos do solo, sendo 31,21% para a CP 1; 18,13% para a CP 2; 12,85% para CP 3; 6,71% para a CP 4 e 5,03% para CP5. Na análise de componentes principais das variáveis fenológicas, o IV Rededge 23 DAE foi a variável que apresentou maior carga fatorial na componente principal 1, seguido pelas variáveis capulho 185 DAE e altura de plantas aos 39 DAE (Tabela 3).

TABELA 3. Análise de componentes principais e suas contribuições das variáveis (%) dos dados da fenologia do algodoeiro.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Autovalor	5,93	3,44	2,44	1,28	0,96
Variabilidade (%)	31,21	18,13	12,85	6,71	5,03
% cumulada	31,21	49,34	62,19	68,90	73,94
Variáveis	Contribuições nos componentes principais				
Produtividade	0,080	0,004	0,159	0,004	0,021
AP26	0,067	0,027	0,027	0,049	0,116
AP39	0,082	0,040	0,033	0,000	0,081
AP51	0,068	0,029	0,017	0,100	0,029
AP68	0,069	0,011	0,092	0,000	0,030
AP82	0,002	0,007	0,018	0,546	0,006
AP107	0,000	0,003	0,257	0,007	0,212
AP128	0,075	0,035	0,034	0,017	0,006
AP185	0,024	0,106	0,000	0,022	0,298
BOT68	0,001	0,078	0,061	0,132	0,001
BOT82	0,027	0,172	0,004	0,044	0,000
BOT107	0,058	0,001	0,077	0,002	0,013
BOT128	0,029	0,140	0,001	0,008	0,039
CAP185	0,119	0,001	0,001	0,045	0,001
RE23	0,123	0,000	0,025	0,001	0,027
RE35	0,077	0,081	0,006	0,020	0,001
RE53	0,038	0,116	0,047	0,001	0,094
RE91	0,058	0,005	0,113	0,002	0,018
RE168	0,002	0,145	0,030	0,000	0,007

**AP_AAA: altura das plantas aos AAA DAE; BOT_BBB: número de botões florais aos BBB DAE; CAP185: número de capulho aos 185 DAE; RE_DDD: índice de vegetação aos DDD DAE.

A variável de maior contribuição no componente principal 2, foi botões florais aos 82 DAE, seguido das leituras de IV Rededge aos 168 DAE e botões florais aos 128 DAE, sendo que botões florais aos 107 DAE foi uma das variáveis que apresentou a maior correlação com a produtividade do algodão ($r=0,52$). Segundo LUZ et al. (1997), em condição de estresse hídrico, a fase de floração e/ou frutificação são os mais sensíveis para o algodoeiro, causando queda de botões florais e maçãs, impactando diretamente na produtividade e qualidade do fruto.

A correlação fenológica com a produtividade do algodoeiro estabelece ligação com resultado dos atributos físicos e químicos do solo, pois com a relação umidade do solo aos 79 DAE e a disponibilidade de P afetaram diretamente a fase de floração e desenvolvimento das estruturas reprodutivas, resultando em maior número de capulhos por planta e consequentemente maior produtividade (SILVA et al., 1990).

Portanto, as outras variáveis que serão utilizadas no estabelecimento das zonas de manejo são: Ca/Mg, teor de argila e IV Rededge 23 DAE. É importante destacar a importância da utilização da ACP para identificar essas variáveis. SANTI et al. (2012) relatam que, normalmente, a correlação linear entre os atributos químicos e físicos com a produtividade de culturas anuais é baixa ($<0,50$) o que impede isolar fatores bióticos e abióticos que influenciam a produção da cultura. Na agricultura de precisão, dificilmente uma única variável conseguirá explicar, isoladamente, a variabilidade espacial da produtividade de culturas como o algodão. Neste caso, o uso de técnicas que permitem a redução da dimensionalidade como a ACP é importante para identificar e interpretar a distribuição das variáveis originais de maior peso.

Estabelecimento das zonas de manejo no algodoeiro

A análise geoestatística com intuito de mapear as variáveis dos atributos físicos e químicos do solo e fenológicos do algodoeiro foi realizada utilizando os atributos que mais correlacionaram com a produtividade, segundo os resultados da análise de correlações de Pearson e maior contribuição com o CP1. Na Tabela 4 encontram-se o efeito pepita, o patamar, o alcance, os modelos de semivariograma ajustados aos dados amostrais das CP dos atributos físicos, químicos do solo e fenológicos do algodoeiro de maior correlação com a produtividade, bem como a relação efeito pepita/patamar e o grau de dependência espacial.

TABELA 4 Parâmetros dos semivariogramas, para as componentes principais dos dados físicos e químicos do solo e fenológicos do algodoeiro de maior correlação com a produtividade do algodoeiro.

	Modelo	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (m)	DE(%)
Al ³⁺	exponencial	0,067	0,848	883,627	92,1
Ca/Mg	exponencial	0,002	0,707	1.581,5635	99,7
US39	gaussiano	1,771	169,753	1.581,465	99,0
ARG	gaussiano	113,337	12.782,527	1.545,654	99,1
BOT107	esférico	0,000	24,785	659,604	100
RE23	esférico	0,837	1,600	409,829	47,7
zonas de manejo 2	gaussiano	0,187	0,247	342,697	24,4
zonas de manejo 3	gaussiano	0,088	0,441	376,050	80,0
zonas de manejo 4	gaussiano	0,582	1,013	412,238	42,5

**Al³⁺: alumínio; Ca/Mg: relação cálcio e Magnésio; US39: umidade do solo 39 dias após emergência; ARG: teor de argila; BOT107: número de botões florais 107 dias após emergência; RE23: índice vegetativo 23 dias após emergência; DE – dependência espacial, dado por (C/Co+C)

Os atributos que mostraram dependência espacial ajustaram-se ao modelo exponencial para Al³⁺, Ca/Mg. Para as variáveis US39, argila, zonas 2, zonas 3 e zonas 4, foi ajustado o modelo gaussiano e para BOT1077 e RE23 o modelo foi esférico.

Todas as variáveis apresentaram dependência espacial. Importante, pois, segundo CAMBARDELLA et al. (1994), a dependência espacial indica a variabilidade ajustada e pelo modelo teórico do semivariograma, possibilitando a interpolação pela metodologia da krigagem.

De acordo com MACHADO et al. (2007), um parâmetro das maiores relevâncias no estudo dos semivariograma é o alcance, que significa a distância máxima em que uma variável esta correlacionada espacialmente. O alcance de um atributo mapeado garante que todos os vizinhos (dentro de um círculo com esse raio) possuem continuidade espacial e podem ser usados para estimar valores em qualquer posição entre eles.

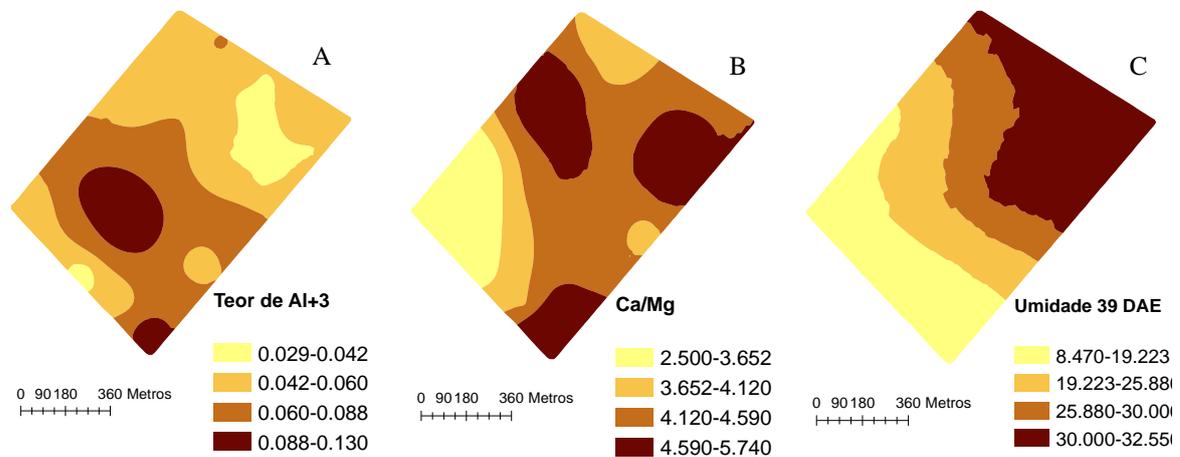
Os menores valores de alcance foram 342,6 m para zonas de manejo 2 e 376,0 m para o zonas de manejo 3, e o maior, para Ca/Mg, US39 e argila.

A recente utilização da lógica Fuzzy em trabalhos relacionados à agricultura pode ser observada na literatura, como o de TAGARAKIS et al. (2012), que utilizou a lógica para delimitação de unidades de manejo em campos de produção de uva, como também o de SILVA et al. (2013) que trabalhou com estimativa de produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro Fuzzy.

A técnica de componentes principais, associada à geoestatística, tem permitido abordagens eficientes em ciências agrárias, principalmente por considerar, simultaneamente, a variação espacial de um número elevado de variáveis que influenciam os sistemas de produção agrícolas (SILVA et al., 2010).

LIMA et al. (2013) estudaram a dependência espacial da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, utilizando de forma conjunta, técnicas de geoestatística e estatística multivariada, apresentando resultados satisfatórios da distribuição da fertilidade do solo.

Na Figura 4 estão apresentadas as ilustrações dos mapeamentos dos atributos de maior correlação com a produtividade e as zonas de manejo definidas pelo programa MZA após a análise dos componentes principais. Observa-se que o mapa das zonas de manejo com duas classes (Figura 4G) apresenta menor variabilidade espacial, resultando em um mapa mais simples, de melhor facilidade de gerenciamento das aplicações agrícolas, todavia, com maior valor de 0,091 do índice ICE (Entropia de Classificação da Imagem) obtido pelo programa MZA. Já o mapa com quatro zonas de manejo (Figura 4I) possui maior variabilidade da representação das classes, obteve o menor valor do índice ICE (0,067) tornando-se o mapa aplicável no gerenciamento das aplicações de insumos agrícolas.



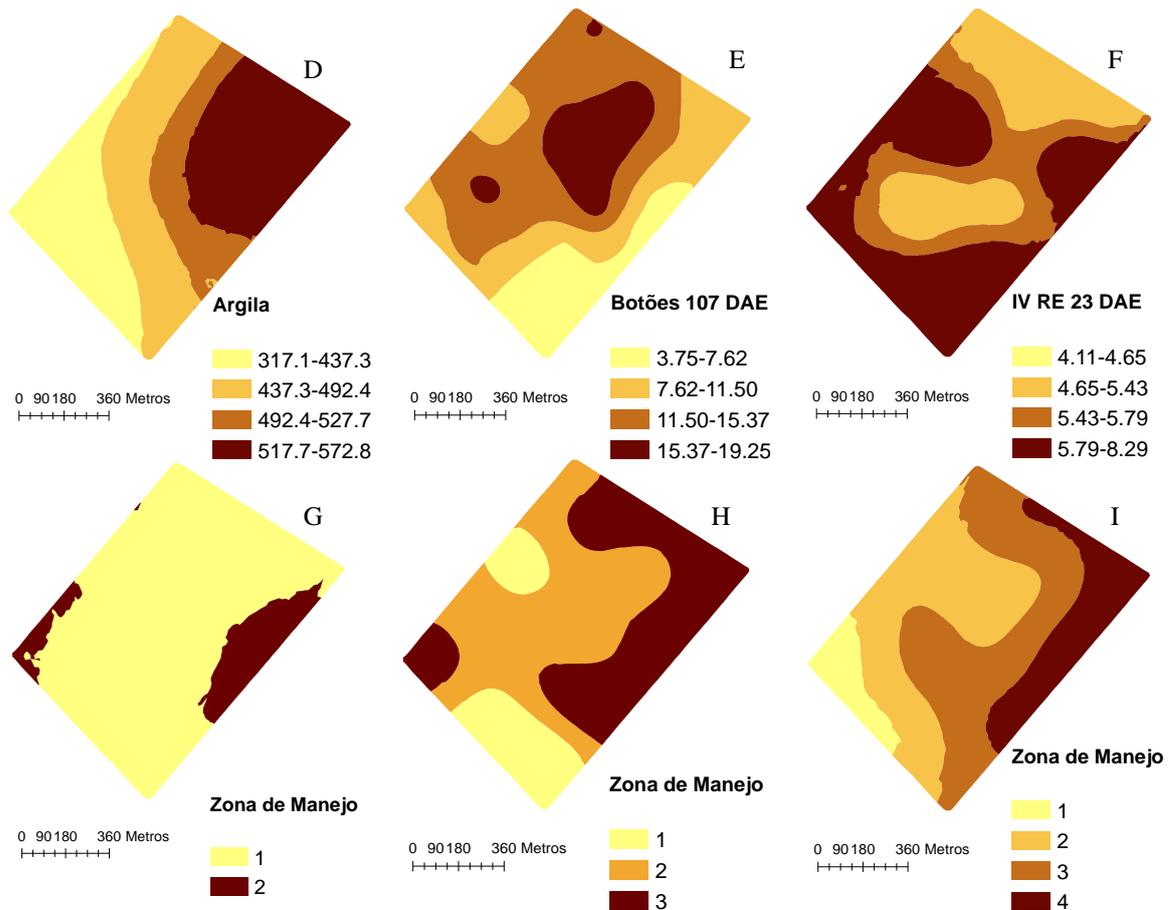


FIGURA 4. Distribuição espacial de cada variável de maior correlação com a produtividade do algodoeiro e mapas das zonas de manejo com duas, três e quatro classes, segundo a análise dos componentes principais.

4 CONCLUSÕES

Os principais atributos que possuem maior relação com a produtividade do algodoeiro são: Al^{3+} , umidade do solo aos 39 DAE, botões florais aos 107 DAE.

O uso das técnicas de análise dos componentes principais dos atributos físicos e químicos do solo, e das variáveis fenológicas do algodoeiro identificam quais as variáveis mais adequadas para a aplicação da técnica da lógica Fuzzy com o intuito da definição das zonas de manejo.

O mapa com quatro zonas de manejo possui uma melhor representação das zonas de manejo, sendo o mais indicado no gerenciamento das aplicações de insumos agrícolas.

REFERÊNCIAS

- AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.831-843, 2009.
- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; SCHEPERS, J.S. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, v.107, n.4, p.1513-1523, 2015.
- ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C.A.; CRUSCIOL, C.A.; RODRIGUES, J.D.; BÜLL, L.T. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.12, p.2437-3446, 2000.
- ANSELMO, J.L.; LEAL, A.J.F. Cultivares de Algodão: Chave para o Sucesso. **Cultivar Grandes Culturas**, v.12, n.132, p.26-28, 2010.
- BEZDEK, J. C. **Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**. Kluwer Academic Publishers: Norwell. 1981. 256 p.
- BHERING, L. L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology (Online)**, v. 17, p. 187-190, 2017.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M.C.S.; BERNARDI, A.C.C.; FERREIRA, G.B. O potássio na cultura do algodoeiro. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. Cap.14. p.393-404.
- CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.613-620. 2012.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, v.2 - Safra 2014/15, n.6 - Sexto Levantamento, Brasília, p. 1-103, mar. 2015.
- COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.4, p.828-835, 2006.

- Custo de Produção de Algodão Safra 14/15: **IMEA – Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária**, 2017. Disponível em: <<http://www.imea.com.br>>. Acesso em 04 de março de 2017.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SCAPIM, C.A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.9-19, 2007.
- FRAISSE, C. W.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. **Transactions of the ASABE**, v.44, n.1, p.155-166, 2001.
- FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no cerrado do Brasil**. 3. ed. Brasília, DF: Editora Positiva 2015. 956 p. il. color.
- FRIDGEN, O. S., 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. 6, p.100–108, 2004.
- HAIR JR., J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E. & TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Bookman, 2009. 688 p.
- LIMA, S. D. L.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.16-23, 2013.
- LUZ, M. J. da S. e; BEZERRA, J. R. C.; SANTANA, J. C. F. de; DIAS, J. M. Efeito da deficiência hídrica sobre o rendimento e a qualidade de fibra do algodoeiro. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.1, n.1, p.125-133, 1997.
- MACHADO, L. O.; LANA, A. M.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v.31. n.3, p.591-599, 2007.
- MANUAL DE ADUBAÇÃO E DE CALAGEM PARA OS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA / SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Comissão de Química e Fertilidade do Solo**. - 10. ed. 2004. Disponível em: http://www.sbcs-nrs.org.br/docs/manual_de_adubacao_2004_versao_internet.pdf>. Acesso em 04 de março de 2017.

- MARTIN, M. Z.; MAYES, M. A.; HEAL, K. R.; BRICE, D. J.; WULLSCHLEGER, S. D. Investigation of laser-induced breakdown spectroscopy and multivariate analysis for differentiating inorganic and organic C in a variety of soils *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, v.87, s.n. p.100-107, 2013.
- MARUR, C. J., RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosa*, v.5, n.2, p.313-317, 2001.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**. Belo Horizonte. Editora UFNG, 2005. 295 p.
- NUTI, R.C.; CASTEEL, S.N., VIATOR, R.P.; LANIER, J.E; EDMISTEN, K.L.; JORDAN, D.L.; GRABOW, G.L.; BARNES, J.S.; MATEWS, J.W.; WELLS, R. Management of cotton grow under overhead sprinkle and sub – surface drip irrigation. *Journal of Cotton Science*, Sidney, v. 10, p. 76-88, 2006.
- 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.
- OERKE, E. C.; GERHARDS, R.; MENZ, G.; SIKORA, R.A. Precision crop protection – the challenge and use of heterogeneity. In: HILL, J.; UDELHOVEM, T.; VOHLAND, M.; JENSEN, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. In: JENSEN, J. R. Earth Resource Analysis Perspective. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 1949. Cap.1. p.358-360.
- PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture*, v.13, n.1, p.33-44, 2012.
- SALVADOR, A., ANTUNIASSI, U.R. Multispectral image for management zones identification and variable rate application in cotton areas. (In Portuguese, with English abstract). *Revista Energia na Agricultura*, v.26, n.2, p.1-19, 2011.
- SANTI, L. S.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, n.9, p.1346-1357, 2012.
- SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, C. M. C. Estimativa de produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro Fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180-187, 2013.

- SILVA, M. O.; SANTOS, M. B. G. F.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Aguas salinas , na região de Mossoró (RN), com o uso de análise multivariada. **Ambiência**, v.6, n.2. p.261-270, 2010.
- SILVA, N.M.; CARVALHO, L.H.; SABINO, J.C.; LELLIS, L.G.L.; SABINO, N.P.; KONDO, J.I. Modo e época de aplicação de fosfatos na produção e outras características do algodoeiro. **Bragantia**, v.49, n.1. p.157-170, 1990.
- SILVA, N. M.; RAIJ, B. van; CARVALHO, L. H.; BATAGLIA, O. C.; KONDO, J. I. Efeitos do calcário e do gesso nas características químicas do solo e na cultura do algodão. **Bragantia**, v. 56, n.2. p.389-401, 1997.
- STATSOFT. Statistica 7.0. Tulsa: StatSoft, 2004. p.250.
- TAGARAKIS, A.; LIAKOS, V.; FOUNTAS, S.; KOUNDOURAS, S.; GEMTOS, T. A. Management Zones delineation using Fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, v.1, n.14, p.18-39, 2012.
- TUKEY, J.W. **Exploratory data analysis**. 1.ed. Addison-Wesley: Massachusetts. 1977.
- VIEIRA, S. R.; GUEDES FILHO, O.; CHIBA M. K.; MELLIS, E. V.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C. DE. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34. s/n.p.1503-1514, 2010.