Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de
fitorreguladores no algodoeiro

Rodrigo Gonçalves Trevisan

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Rodrigo Gonçalves Trevisan
Engenheiro Agrônomo

Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de
fitorreguladores no algodoeiro

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Trevisan, Rodrigo Gonçalves

Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de fitorreguladores no algodoeiro / Rodrigo Gonçalves Trevisan. - Piracicaba, 2016.

86 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Agricultura de precisão 2. Variabilidade espacial 3. Aplicação em taxas variáveis 4. *Gossypium hirsutum* I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico a meus pais,
Enio e Adelaide, e a minha irmã Roberta,
pelo apoio incondicional, incentivo e dedicação ao longo dessa caminhada,
pois sem eles jamais teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, pela vida, saúde, força e pelas oportunidades a mim oferecidas e por me guiar nesta longa caminhada.

À minha família pela educação, princípios morais, dedicação e confiança e por darem-me a oportunidade de escolha e sempre me apoiarem.

À Universidade Federal de Mato Grosso, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e à Escola Municipal Rural Produtiva Ranchão, pelas oportunidades de enriquecimento profissional e pessoal e pelo ensino de qualidade durante minha formação no ensino médio e superior, que permitiram que eu chegasse ao Mestrado.

Aos colaboradores da APagri Consultoria Agrônômica, em especial ao Tiago Capello Garzela, pela oportunidade de aprendizado e o apoio prestado sempre que necessário.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, por me conceder esta oportunidade tão valiosa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

Ao Professor José Paulo Molin, pela orientação, amizade, paciência, profissionalismo e pelos votos de confiança e incentivo no desenvolvimento deste projeto.

Aos colegas do Laboratório de Agricultura de Precisão - LAP, por proporcionaram um ambiente acolhedor e proporcionarem experiências marcantes para o meu crescimento profissional e pessoal. Agradecimentos especiais ao Natanael de Santana Vilanova Júnior, meu parceiro de projeto de pesquisa e amigo. Aos pós-graduandos Gustavo Portz, Mateus Tonini Eitelwein e André Colaço, a todos os integrantes do Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão – gMAP, aos colaboradores do departamento de Engenharia de Biossistemas Áureo, Juarez e Francisco (Chicão) e todos os demais que contribuíram no desenvolvimento das atividades necessárias para o sucesso do projeto.

A todos os parceiros do Projeto (YARA, STARA), pelo apoio e por nunca medirem esforços para a realização deste trabalho.

Aos produtores, por concederem áreas, por auxiliarem na condução das culturas e na execução dos experimentos e pelo interesse em pesquisar e evoluir nos conhecimentos científicos e técnicos que regem seus trabalhos. Aos responsáveis técnicos pela condução das lavouras, Danilo Carvalho Neves e Adrian Cleber Mognon.

Finalmente, a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje, de todo meu coração, MUITO OBRIGADO!

EPÍGRAFE

“Whether you think you can, or you think you can't—you're right.”

(“Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer forma você está certo”)

Henry Ford

BIOGRAFIA

RODRIGO GONÇALVES TREVISAN, nascido em 16 de dezembro de 1991, em Francisco Beltrão – PR, mudou-se para Sorriso – MT em 1998, tornando-se um admirador da agricultura mato-grossense. Foi aluno do curso técnico em agropecuária da Escola Municipal Rural Produtiva Ranchão em Nova Mutum – MT nos anos 2007 e 2008. Também em 2007 e 2008 foi premiado com medalha de bronze na Olimpíada Brasileira de Matemática das Escolas Públicas – OBMEP e tornou-se bolsista no programa de iniciação científica e mestrado – PICME. Em 2009 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Universitário de Sinop, e em 2011 realizou mobilidade acadêmica nacional no curso de Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Obteve o título de Engenheiro Agrônomo em 2013, apresentando monografia com o título “Variabilidade espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho–Amarelo cultivado com arroz em sistema de integração lavoura–pecuária”. No mesmo ano mudou-se para Piracicaba para realização de estágio na empresa APagri Consultoria Agrônômica. Em 2014 ingressou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Em 2015 mudou-se para Nova Mutum – MT para exercer a função de Coordenador de Agricultura de Precisão da Vanguarda Agro S/A.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Aplicação de Nitrogênio no algodoeiro	19
2.2. Aplicação de fitorreguladores no algodoeiro	20
2.3. Aplicação em taxas variáveis baseada em sensores.....	22
2.4. Experimentos ao nível de fazenda	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Caracterização dos locais.....	25
3.2. Avaliação do desempenho dos sensores de dossel	29
3.3. Avaliação da resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada	31
3.4. Desenvolvimento dos algoritmos para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real	37
3.5. Validação dos algoritmos para redistribuição das doses de nitrogênio	39
3.6. Avaliação do potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Desempenho dos sensores.....	47
4.2. Resposta ao N aplicado em cobertura.....	56
4.3. Definição dos algoritmos para a aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real baseadas nas leituras dos sensores	63
4.4. Validação dos algoritmos para redistribuição das doses de nitrogênio	66
4.5. Avaliação do potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura	77
5. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXOS	85

RESUMO

Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de fitorreguladores no algodoeiro

Devido à existência de variabilidade espacial nos fatores que afetam o desenvolvimento do algodoeiro, faz-se necessário investigar a hipótese de que existem diferenças na dose de máximo retorno econômico da aplicação de nitrogênio (N) em cobertura e de fitorreguladores em áreas de cultivo de algodão. Assim, esse trabalho teve como objetivo investigar o potencial da utilização de sensores ativos de dossel para detecção da variabilidade espacial do desenvolvimento das plantas e da nutrição nitrogenada existente em áreas de produção de algodão, bem como estabelecer estratégias de gestão da variabilidade com o uso de taxas variáveis na adubação nitrogenada de cobertura e na aplicação de fitorreguladores no algodoeiro. Foram conduzidos experimentos em áreas comerciais de cultivo do algodoeiro localizadas em Chapadão do Céu – GO nas safras 2012/2013 e 2013/2014 e em Campo Verde – MT na safra 2014/2015. Avaliou-se o desempenho de dois modelos de sensores ativos de dossel em prever a altura de plantas e o acúmulo de biomassa e N no algodoeiro, considerando dois sistemas de produção (espaçamento convencional e adensado) e vários estágios de desenvolvimento da cultura. Foram instaladas parcelas para calibração das curvas de dose resposta do algodoeiro ao nitrogênio em cobertura em diferentes condições de desenvolvimento da cultura relacionadas a variações no solo ou no histórico de produtividades no interior do talhão. Com base nos resultados dos experimentos foram desenvolvidos e validados algoritmos para aplicação em taxas variáveis de N e fitorreguladores, adotando-se o conceito de experimentos em nível de fazenda, com o modelo estatístico considerando a condutividade elétrica do solo como uma covariável e uma matriz de variância-covariância espacial, que foi ajustada pelo método da máxima verossimilhança. O desempenho geral dos sensores foi satisfatório, sendo capazes de prever a altura de plantas e o acúmulo de biomassa e N no algodoeiro com valores de R^2 acima de 0,90. Observou-se interação significativa com o espaçamento das fileiras e a fase de desenvolvimento da cultura, com performance inferior em situações de pequena variabilidade na cultura ou de acúmulo de biomassa muito grande. A resposta do algodoeiro ao nitrogênio aplicado em cobertura variou de acordo com as condições de cultivo de cada experimento. Maiores respostas foram observadas em áreas de médio e baixo potencial produtivo, existindo talhões e partes de talhões em que a aplicação de N não proporcionou incremento de produtividade, enquanto que em outras áreas observou-se aumento de produtividade expresso por uma relação quadrática entre a dose aplicada e a produtividade. No talhão com as maiores diferenças, a dose de máximo retorno econômico foi de 0 kg ha⁻¹ na região de alto potencial produtivo, 165 kg ha⁻¹ na região de médio potencial produtivo e 280 kg ha⁻¹ na região de baixo potencial produtivo. Na análise dos experimentos em nível de fazenda, o melhor ajuste foi obtido no modelo que considera a dependência espacial dos resíduos, evidenciando que em experimentos dessa dimensão não se deve assumir que os princípios da estatística clássica são sempre satisfeitos. Em três áreas não foram observadas diferenças significativas entre a aplicação do N em cobertura em taxa fixa ou usando os algoritmos para aplicação em taxa variável, devido à homogeneidade da área e da interferência de outros fatores. Em uma das áreas observou-se vantagem para a aplicação em taxas variáveis usando o algoritmo que recomenda aplicação de maiores doses de N nos locais em que as plantas apresentam menor desenvolvimento vegetativo, com produtividade cerca de 100 kg ha⁻¹ que a aplicação em taxa fixa e cerca de 300 kg ha⁻¹ superior à obtida com a aplicação em taxas variáveis usando o algoritmo que recomenda aplicação de maiores doses de N nos locais em que as plantas apresentam-se mais vigorosas. A aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis não apresentou efeito significativo na produtividade de algodão em caroço, entretanto o volume consumido dos produtos foi em média 18% menor na aplicação em taxa variável, principalmente em função das áreas que não foram aplicadas por apresentarem desenvolvimento vegetativo reduzido.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Variabilidade espacial; Aplicação em taxas variáveis; *Gossypium hirsutum*.

ABSTRACT

Crop canopy sensor-based management of nitrogen and plant growth regulators in cotton

Due to the existence of spatial variability in factors affecting cotton development, it is necessary to investigate the hypothesis that there are differences in the economic optimum fertilizer rates of top dressing nitrogen (N) and plant growth regulators (PGR) applications in cotton fields. Thus, the objective of this study was to investigate the potential of using active crop canopy sensors to detect the spatial variability of plant development and nitrogen nutrition in cotton fields and to establish strategies for managing spatial variability using variable rate technology to apply N and PGR in cotton. We conducted experiments in commercial cotton production fields located in the state of Goiás, in 2012/2013 and 2013/2014 seasons, and in the state of Mato Grosso, in 2014/2015 season. We evaluated the performance of two models of active crop canopy sensors to predict the height of plants and the accumulation of biomass and N in cotton, considering two production systems (conventional and narrow row spacing) and various growth stages. Within-field variations in the response curve to the increasing doses of nitrogen was evaluated under different crop development conditions related to variations in soil and historical yields. Based on the results of the experiments we developed and validated algorithms for variable rate application of N and PGR, using on-farm experiments. The statistical model considered the soil electrical conductivity as a covariate and a spatial variance-covariance matrix, which was adjusted by maximum likelihood. The overall performance of the sensors was satisfactory, predicting the height of plants and the accumulation of biomass and N in cotton with R^2 values above 0.90. There was a significant interaction with the row spacing and the development stage of the crop, with lower performance in situations of low variability or very large biomass accumulation. The cotton response to top dressing nitrogen varied according to growing conditions of each experiment. Major responses were observed in areas of medium and low yield potential. There were fields and plots within fields in which the application of N did not increased yields, while in other areas there was a quadratic relationship between the dose applied and yield. In the field with the biggest differences, the economic optimum fertilizer rates of top dressing N was 0, 165 and 280 kg ha⁻¹ in the high, medium and low yield potential zones, respectively. In the analysis of on-farm experiments, the best fit was obtained in the model that considered the spatial dependence of the residues, showing that experiments of this size we should not assume that the principles of classical statistics are always satisfied. In three areas, there was no significant differences between the application of N in fixed rate or using the algorithms for variable rate application, due to the homogeneity of the areas and the interference of external factors. In one of the areas, there was an advantage for application at variable rates using the algorithm that recommends application of higher doses of N in places where the plants have low vegetative development. The yields were about 100 kg ha⁻¹ higher than the application of a fixed rate and 300 kg ha⁻¹ higher than that obtained with the application of variable rates using the algorithm that recommends applying higher doses of N in places where the plants were more vigorous. The variable rate application of PGR had no significant effect on cottonseed yield, however the amount of products used was on average 18% lower in the variable rate application, mainly due to the not applied areas.

Keywords: Precision Agriculture; Spatial Variability; Variable rate application; *Gossypium hirsutum*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos municípios onde foram realizados os experimentos em relação a localização da ESALQ em Piracicaba - SP.	25
Figura 2. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2012/2013 em Chapadão do Céu – GO.	26
Figura 3. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2013/2014 em Chapadão do Céu – GO.	26
Figura 4. Localização das áreas experimentais em Chapadão do Céu – GO.	27
Figura 5. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2014/2015 em Campo Verde - MT.	28
Figura 6. Localização das áreas experimentais em Campo Verde – MT.	28
Figura 7. Locais de instalação dos sensores na máquina e campo de visada aproximado de cada sensor. Detalhes de como ficam as plantas observadas do mesmo ângulo que os sensores.	30
Figura 8. Visão geral das lavouras aos 38, 51 e 85 DAE no cultivo de algodão em espaçamento convencional e aos 33, 51 e 72 DAE no cultivo de algodão adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	30
Figura 9. Composições coloridas com as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM a bordo do satélite LANDSAT 5. Imagens obtidas em 17/01/1988 (Cerrado nativo), 16/02/1999 (Pastagem), 07/05/2005 (Cobertura com milho) e 10/01/2009 (Soja).....	33
Figura 10. Mapa de condutividade elétrica aparente do solo e da localização das parcelas experimentais no talhão TA4, cultivado com algodoeiro na safra 2014/2015, em Campo Verde – MT.	34
Figura 11. Demarcação das parcelas e aplicação do N em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.	35
Figura 12. Detalhes da colhedora de algodão tipo Picker e do sistema de monitoramento de produtividade utilizados na colheita da área experimental: a) Unidade de colheita; b) Receptor GNSS; c) Monitor GS3; d) Sensor de micro-ondas do fluxo de algodão.	41
Figura 13. Detalhes da colhedora de algodão adaptada com plataforma tipo Stripper e do sistema de monitoramento de produtividade utilizados na colheita da área experimental: a) Receptor GNSS; b) Monitor Insight; c) Sensor óptico do fluxo de algodão; d) Plataforma tipo pente;.....	43

Figura 14. Aplicação de regulador de crescimento no algodoeiro em taxa variável com pulverizador autopropelido JD 4630.	44
Figura 15. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor CropSpec para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2012/2013 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	48
Figura 16. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor Crop Circle para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	50
Figura 17. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor CropSpec para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	51
Figura 18. Mapas do índice de vegetação do sensor CropSpec (IVCS) observados aos 51 e 72 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	53
Figura 19. Mapas do índice de vegetação do sensor CropSpec (IVCS) observados aos 51 e 85 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	54
Figura 20. Mapas do índice de vegetação por diferença normalizada pelo “red-edge” (NDRE) do sensor Crop Circle observados aos 51 e 72 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	55
Figura 21. Mapas do índice de vegetação por diferença normalizada pelo “red-edge” (NDRE) do sensor Crop Circle observados aos 51 e 85 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.....	56
Figura 22. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.	57
Figura 23. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Chapadão do Céu – GO.	58

Figura 24. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Campo Verde - MT.....	59
Figura 25. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT...60	60
Figura 26. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.....	61
Figura 27. Algodoeiro cultivado em espaçamento adensado aos 150 dias após a emergência em área de baixo (esquerda) e alto (direita) potencial produtivo no mesmo talhão na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.....	62
Figura 28. Algoritmo com inclinação negativa para aplicação de nitrogênio em taxa variável.....	64
Figura 29. Algoritmo com inclinação positiva para aplicação de nitrogênio em taxa variável.....	64
Figura 30. Grande variação no desenvolvimento das plantas observado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.....	66
Figura 31. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	68
Figura 32. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	68
Figura 33. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	69
Figura 34. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	70
Figura 35. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	70
Figura 36. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	71

- Figura 37. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT. 72
- Figura 38. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT..... 73
- Figura 39. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT. 74
- Figura 40. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT..... 76
- Figura 41. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT..... 76
- Figura 42. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT. 77
- Figura 43. Algoritmo esquemático para aplicação de fitorreguladores em taxa variável..... 78
- Figura 44. Apodrecimento de estruturas vegetativas devido ao crescimento excessivo em área com plantas com alto vigor vegetativo e ocorrência de plantas daninhas em área com limitações ao desenvolvimento satisfatório do algodoeiro cultivado em 2014/2015, em Campo Verde - MT..... 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização das áreas experimentais utilizadas para avaliação do desempenho dos sensores em prever o acúmulo de biomassa e nitrogênio no algodoeiro, em Campo Verde – MT.	29
Tabela 2. Características técnicas dos dois sensores utilizados.....	31
Tabela 3. Caracterização das áreas experimentais utilizadas para calibração das curvas de dose resposta do algodoeiro ao nitrogênio em cobertura.	32
Tabela 4. Resultado de análise do solo a partir de amostras coletadas antes da instalação dos experimentos no TA4, cultivado com algodoeiro na safra 2014/2015, em Campo Verde – MT.	34
Tabela 5. Caracterização das áreas experimentais utilizadas na validação dos algoritmos para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real.....	39
Tabela 6. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel CropSpec e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2012/2013, Chapadão do Céu – GO.....	47
Tabela 7. Desempenho do sensor CropSpec em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2012/2013 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	49
Tabela 8. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel Crop Circle e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2012/2013, Chapadão do Céu – GO.	49
Tabela 9. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel CropSpec e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2013/2014, Chapadão do Céu – GO.....	51
Tabela 10. Desempenho do sensor CropSpec em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	52
Tabela 11. Desempenho do sensor CropCircle em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	54
Tabela 12. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.....	56

Tabela 13. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Chapadão do Céu – GO.	58
Tabela 14. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Campo Verde - MT.	58
Tabela 15. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.	59
Tabela 16. Resumo da análise de variância da resposta em produtividade ao N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.	60
Tabela 17. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado em solo de textura arenosa, em Campo Verde – MT.	61
Tabela 18. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado em solo de textura arenosa, em Campo Verde – MT.	61
Tabela 19. Coeficiente de variação da dose de N aplicada em cobertura de acordo com os algoritmos utilizados para aplicação em taxa variável.	65
Tabela 20. Seleção dos modelos para análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em áreas com diferentes níveis de variabilidade espacial.	67
Tabela 21. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	67
Tabela 22. Produtividade média de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	67
Tabela 23. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.	69

Tabela 24. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT.....	72
Tabela 25. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT.	75
Tabela 26. Produtividade média de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.....	75
Tabela 27. Aplicações de fitorreguladores no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.	78
Tabela 28. Seleção do modelo para análise estatística do efeito da aplicação de fitorreguladores em taxa variável no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.....	79
Tabela 29. Resumo da análise estatística do efeito da aplicação de fitorreguladores em taxa variável na altura final de plantas e na produtividade de algodão em caroço no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT.....	79

1. INTRODUÇÃO

Algodão é o nome comum utilizado para se referir a várias espécies do gênero *Gossypium*, que são plantas pertencentes à família *Malvaceae*. É uma planta subtropical com variados centros de origem, incluindo a América do Sul, o Oriente Médio e a Ásia. Existem registros de que a domesticação do algodoeiro ocorreu há mais de 4.300 anos no sul da Arábia e que os Incas, no Peru e outras civilizações antigas, já utilizavam o algodão há mais de 5.500 anos (WENDEL et al., 2010). Embora existam várias espécies cultivadas ao redor do mundo, a cotonicultura comercial brasileira emprega principalmente o algodão herbáceo, que pertence à espécie *Gossypium hirsutum* var. *latifolium* Hutch.

O Brasil é o quinto maior produtor de fibra de algodão do mundo, atrás da China, Índia, Estados Unidos e Paquistão (FAO, 2012). Essa posição foi conquistada porque a produtividade nacional de algodão em caroço aumentou em dez vezes desde o final da década de 1970. O aumento de produtividade permitiu que a produção dobrasse, embora a área cultivada atualmente corresponda a apenas um quarto da área ocupada com a cultura no final da década de 1970, devido aos problemas fitossanitários e econômicos que os produtores enfrentaram (HOOGERHEIDE et al., 2013).

A área cultivada com algodão no Brasil nas últimas 3 safras tem sido em média 1 milhão de hectares, com algumas variações em função do cenário de mercado para o setor e dos custos de produção (CONAB, 2015). A produtividade média nacional de algodão em caroço superou a marca 4.000 kg ha⁻¹ na safra 2014/15, o que faz do Brasil o país com a maior produtividade de algodão cultivado em sequeiro do mundo. Embora essa média seja razoável, muitos produtores têm apostado no aprimoramento de técnicas para aumentar a produtividade da cultura, adotando elevado nível de tecnologias.

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento do algodoeiro, sendo responsável por estimular o crescimento e o florescimento, regularizar o ciclo da planta, aumentar a produtividade e melhorar o comprimento e a resistência da fibra, desde que fornecido em doses adequadas. Entretanto, a definição da dose ideal de N a ser aplicada sempre foi um grande desafio devido à dificuldade de mensurar a quantidade de N mineralizado pela matéria orgânica do solo e a alta mobilidade do nitrato no perfil do solo (PORTZ et al., 2012).

Por se tratar de uma planta perene que é cultivada como cultura anual, o algodoeiro pode crescer de forma descontrolada e apresentar arquitetura e porte de plantas desfavoráveis à máxima produtividade e a colheita mecanizada. A fim de controlar essa tendência natural são utilizados reguladores de crescimento vegetal que alteram o balanço hormonal da planta, permitindo melhor partição dos fotoassimilados entre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

Uma vez que os fatores promotores do crescimento excessivo e a biomassa da cultura apresentam variabilidade espacial dentro de um talhão, torna-se necessário ajustar a dose do regulador. O uso de uma dose fixa de regulador em todo o talhão pode ser insuficiente para controlar o crescimento das plantas mais vigorosas, enquanto que nas plantas menos desenvolvidas a mesma dose proporcionaria plantas muito baixas. O mesmo é válido para a aplicação de desfolhantes e promotores da abertura de maçãs, pois vários fatores interferem no estado de maturação das plantas.

Assim, são necessárias técnicas de diagnóstico do estado nutricional e vegetativo da cultura em tempo real e com alta resolução espacial, o que pode ser obtido pelo uso de sensores ópticos ativos de dossel. Estes sensores são capazes de estimar parâmetros culturais de interesse medindo a reflectância foliar em estreitos comprimentos de onda, usados para criar índices de vegetação que estão correlacionados ao vigor vegetativo da cultura.

Nesse contexto, faz-se necessário investigar a hipótese de que existem diferenças na dose de máximo retorno econômico da aplicação de N em cobertura e de fitorreguladores em áreas de cultivo de algodão e que sensores ativos de dossel podem ser utilizados para identificar essas diferenças e guiar a aplicação da dose mais adequada em cada parte da área, proporcionando melhores resultados que a aplicação de uma dose fixa em toda a área. Assim, esse trabalho teve como objetivo investigar o potencial da utilização de sensores ativos de dossel para detecção da variabilidade espacial do desenvolvimento das plantas e da nutrição nitrogenada existente em áreas de produção de algodão, bem como estabelecer estratégias de gestão da variabilidade com o uso de taxas variáveis na adubação nitrogenada de cobertura e na aplicação de fitorreguladores no algodoeiro. A verificação da hipótese proposta é baseada em cinco objetivos específicos:

1. avaliar o desempenho dos sensores ativos de dossel Crop Circle e CropSpec, quanto à capacidade de prever o acúmulo de biomassa e nitrogênio no algodoeiro;
2. avaliar localmente a resposta do algodoeiro ao nitrogênio em cobertura e a dose ótima econômica de fertilizante;
3. estabelecer algoritmos para a aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real baseadas nas leituras dos sensores;
4. avaliar a melhor estratégia de redistribuição do fertilizante de acordo com a variabilidade espacial da cultura detectada pelos sensores;
5. avaliar o potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O algodão é cultivado nos cerrados brasileiros em duas épocas distintas, que caracterizam diferentes sistemas de produção. O algodão safra é semeado entre 01/12 e 10/01, período com maior disponibilidade hídrica, o que possibilita a utilização de áreas com menor capacidade de retenção de água no solo, como no caso dos solos com textura arenosa (ZANCANARO e KAPPES, 2012). Nesse sistema o ciclo da cultura é maior, podendo superar os 200 dias, o que torna a planta passível de sofrer com problemas fitossanitários de forma mais intensa e por período mais longo. Os períodos de baixa luminosidade e maior umidade relativa podem aumentar a severidade de doenças como ramulose, ramulária e o apodrecimento de maçãs, principalmente se a planta apresenta crescimento excessivo. Assim o uso de reguladores de crescimento merece maior atenção. O risco com doenças também é levado em consideração na definição do espaçamento entre fileiras, de modo que existe predomínio dos espaçamentos convencionais (0,76 – 0,90 m) com participação crescente dos cultivos adensados (0,38 – 0,50 m) nas semeaduras de janeiro (DIAS e THEODORO, 2013).

O algodão de segunda safra, que é semeado entre o início de janeiro e meados de fevereiro, recebe essa denominação por ser cultivado logo após a colheita de outra cultura, em geral a soja precoce. A vantagem desse sistema, que tem sua área aumentada nos últimos anos, é a possibilidade de intensificação do uso da terra, através do cultivo de duas culturas no mesmo ano agrícola, além da redução do ciclo da cultura, o que leva à redução dos custos de produção. Para o início da semeadura, principalmente após feijão ou soja superprecoce, recomenda-se os espaçamentos convencionais. Já o cultivo adensado, com espaçamento de 0,38 – 0,50 m predomina nas semeaduras a partir de meados de janeiro (ANSELMO et al., 2012).

2.1. Aplicação de Nitrogênio no algodoeiro

O N é um dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, fazendo parte da constituição da clorofila, que possui em seu núcleo quatro átomos de nitrogênio circundando um átomo de magnésio. O composto de clorofila e outros pigmentos são responsáveis pela cor verde da planta, pois absorvem a maior parte dos comprimentos de onda na faixa do azul e do vermelho, refletindo com maior intensidade o verde, durante o processo da fotossíntese, segundo o qual a energia luminosa é usada na quebra das moléculas de água e gás carbônico para gerar compostos carbônicos essenciais às plantas.

No algodoeiro o N estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra, desde que fornecido em doses adequadas. Entretanto quando aplicado em excesso pode causar desequilíbrio nutricional que causa aumento no crescimento vegetativo da planta em detrimento da produção e a formação tardia das estruturas reprodutivas do algodoeiro (STAUT et al., 2002).

A maior parte da adubação nitrogenada em algodão é aplicada em cobertura, sendo a recomendação proposta para o Cerrado a aplicação de 10 a 25 kg ha⁻¹ de N no sulco de semeadura (adubação de base) e duas coberturas: 40% da dose recomendada no aparecimento do primeiro botão floral e 60% da dose no aparecimento da primeira flor (ZANCANARO e TESSARO, 2006).

A adubação nitrogenada é um componente importante tanto no custo de produção quanto na qualidade e produtividade de algodão. O excesso de adubação nitrogenada causa aumento no tamanho dos frutos na parte superior da planta, com um aparente aumento na produtividade. No entanto, ao mesmo tempo em que os frutos da

parte superior da planta são aumentados, o excesso do nutriente faz com que o tamanho dos frutos da parte de baixo e da parte mediana da planta seja diminuído, sem efeito significativo na produção (BOQUET et al., 1994). O excesso de nitrogênio estimula o crescimento vegetativo com prolongamento do ciclo do algodoeiro, o que nem sempre é desejável, principalmente em regiões onde podem ocorrer chuvas durante a colheita ou ataques tardios de pragas e/ou doenças.

O nitrogênio é o nutriente mais importante oriundo do solo na nutrição de plantas, vital para o crescimento e produção da cultura do algodão, existindo em abundância no solo, porém somente 1 a 2% do nitrogênio do solo está disponível às plantas. É o chamado nitrogênio inorgânico, absorvido por esses organismos, principalmente na forma de nitratos; o restante está complexado com a matéria orgânica do solo, não estando imediatamente disponível, pois é liberado lentamente. Por ser um dos nutrientes exigidos em grandes quantidades na cultura do algodoeiro, utilizando-se de 125 a 210 kg de por tonelada de fibra produzida, normalmente se faz necessária a aplicação de fertilizantes minerais para complementar a quantidade de nitrogênio fornecida pelo solo (CARVALHO et al., 2007).

Esse fato fez com que a análise de tecido vegetal tenha sido considerada como a ferramenta mais apropriada para avaliar o estado nutricional da planta quanto ao nitrogênio. Entretanto os custos e o tempo necessário para a amostragem e análise laboratorial não permitem caracterizar a alta variabilidade temporal e espacial encontrada nos campos de produção.

2.2. Aplicação de fitorreguladores no algodoeiro

A condução da lavoura deve levar em consideração o sistema de cultivo e o tipo de colhedora utilizado, com especial atenção para que a altura final das plantas seja adequada à colheita. Assim, recomenda-se altura em torno de 1,5 vezes o espaçamento entre fileiras para algodão convencional (0,76 – 0,90 m) que é colhido com colhedoras do tipo “picker” e para o algodão adensado (0,30 – 0,50 m) que será colhido com colhedoras do tipo “stripper”, o que equivale à altura de 1,20 m para o algodão cultivado com espaçamento de 0,80 m e altura de 0,70 m para o algodão adensado cultivado com espaçamento de 0,45 m. No caso do cultivo de algodão adensado que será colhido com colhedoras do tipo “picker”, recomenda-se que a altura seja de 2 a 2,2 vezes o espaçamento, ou seja, para o espaçamento de 0,45 m a altura final das plantas deve ser próxima a 1,00 m (ZANCANARO e KAPPES, 2012).

Além da necessidade do controle da altura das plantas para facilitar a colheita, este também é importante porque o crescimento excessivo causa redução direta da produtividade, principalmente em função da sensibilidade da planta ao autossombreamento. Devido à baixa transmissibilidade da folha do algodoeiro à luz, as folhas inferiores são sombreadas e têm a capacidade fotossintética reduzida, acelerando a senescência da folha e podendo causar o abortamento de estruturas reprodutivas (CHIAVEGATO et al., 2014).

Dentre os fatores que promovem o excessivo crescimento vegetativo, em detrimento ao desenvolvimento reprodutivo do algodoeiro, destacam-se a disponibilidade adequada de nutrientes, principalmente o nitrogênio, e a água. Assim, plantas bem supridas desses fatores exigem que o controle do crescimento por meio do uso de fitorreguladores seja mais rigoroso, podendo ser necessárias maiores doses e maior número de aplicações (LAMAS e FERREIRA, 2006). Além disso, a quantidade necessária de ingrediente ativo do produto para manter a taxa de crescimento da planta sobre controle é definida em termos de concentração do produto no tecido vegetal, portanto a

dose a ser recomendada por unidade de área é proporcional à quantidade de biomassa presente na área (ECHER et al., 2013).

Para reduzir os problemas com autossombreamento, são amplamente empregados fitorreguladores à base de cloreto de mepiquat (PIX 5% i.a. e PIX HC 25% i.a.) e cloreto de cloromequat (Tuval 10% i.a.). Esses compostos são responsáveis por inibir a biossíntese do ácido giberélico, hormônio responsável pela multiplicação e alongamento celulares, tornando as plantas mais compactas, devido à redução do tamanho dos internódios e do número de nós, o que promove maior retenção de frutos nas primeiras posições dos ramos produtivos, aumento do peso dos capulhos, maior uniformidade na abertura das maçãs e menor retenção foliar, facilitando o manejo para a colheita (CHIAVEGATO et al., 2012; LAMAS e FERREIRA, 2006).

A dose necessária para manter a altura ideal das plantas é variável em função da variedade cultivada, principalmente em relação ao ciclo, época de semeadura e condições climáticas. A dose total recomendada deve ser parcelada em 3 a 5 aplicações, usando-se proporções menores no início da cultura, reservando-se cerca de 40% da dose para a última aplicação. O uso de doses elevadas em plantas pequenas pode provocar o “achatamento da cultura” que reduz a penetração de luz e de defensivos (CHIAVEGATO et al., 2014; LAMAS e FERREIRA, 2006).

O algodão apresenta, em geral, ciclo indeterminado, ou seja, após entrar no período reprodutivo, segue emitindo novas flores mesmo quando os primeiros frutos já estão maduros, portanto existem estruturas reprodutivas em diferentes estádios de desenvolvimento e maturação em uma mesma planta, o que é indesejável para a colheita mecanizada. Assim, é necessário que as plantas sejam desfolhadas, o que é realizado por meio de herbicidas apropriados.

A prática da aplicação de desfolhante requer atenção quanto ao momento e dose ideais. A aplicação antes do momento ideal, enquanto grande parte das estruturas reprodutivas ainda não atingiram a maturidade fisiológica, pode reduzir a produtividade e a qualidade devido a interrupção forçada do ciclo da planta. A aplicação tardia, por outro lado, atrasa a colheita e com isso tem-se maior tempo de exposição da planta no campo a fatores adversos de clima e ataque de pragas, o que leva a deterioração dos primeiros capulhos formados, reduzindo a produtividade e a qualidade de fibra.

Além do momento certo, a aplicação da dose correta também é importante para a produção de fibras de alta qualidade. Quando aplicado em excesso, o desfolhante pode atuar como dessecante, isto é, causar rápida desidratação da folha sem que haja tempo suficiente para a formação de uma camada de abscisão no pecíolo da folha. Isso faz com que a folha, ao invés de murchar e cair ao solo, seque e fique presa na planta. As folhas secas presas às plantas são trituradas pela colhedora e os fragmentos acabam se misturando à fibra, constituindo-se de uma fonte de contaminação que reduz a sua qualidade.

A aplicação de doses insuficientes faz com que as plantas não atinjam a homogeneidade necessária, permanecendo com folhas ou frutos verdes, ou até mesmo iniciando um processo de rebrota em reação ao herbicida, além de aumentar o tempo necessário entre a aplicação do desfolhante e a colheita. A dose ideal do desfolhante também está ligada a outros fatores. Um deles diz respeito ao vigor e à quantidade de biomassa vegetativa da planta, principalmente porque os herbicidas utilizados são geralmente não-sistêmicos e, portanto, devem atingir todas as folhas da planta para que esta seja completamente desfolhada.

O algodão é um produto agrícola de alto valor agregado e a remuneração do produto é feita levando-se em consideração a qualidade da fibra. Para obtenção de fibra de boa qualidade é necessário que a planta seja adequadamente nutrida durante o ciclo e que o controle fitossanitário seja eficiente. Os principais fatores de perda de

qualidade no final do ciclo do algodoeiro são a contaminação por sementes de plantas daninhas e de folhas secas da própria planta.

O manejo do final do ciclo do algodoeiro a fim de preparar a lavoura para a colheita visa remover as folhas da planta sem prejudicar a qualidade da fibra. Para isso existem três grupos distintos de produtos que podem ser utilizados: os desfolhantes com ação hormonal, que estimulam a queda de folhas ainda verdes, chegando a atingir desfolha de até 90% em apenas 7 dias; os herbicidas dessecantes, que causam a morte das folhas por contato, cujo uso deve ser evitado, especialmente no cultivo adensado, pois fazem com que as folhas sequem mas em sua maioria não se desprendam da planta, ficando aderidas à fibra dos capulhos abertos, o que repercute em fibra mais suja; os promotores de abertura de capulhos, que são conhecidos como maturadores e devem ser utilizados quando as maçãs encontram-se fisiologicamente maduras (PAZETTI e FERNANDO, 2012).

2.3. Aplicação em taxas variáveis baseada em sensores

O estudo das curvas espectrais de vegetação, que relacionam a proporção de luz que é refletida em função do comprimento da onda eletromagnética levou ao desenvolvimento de sensores com a capacidade de medir a quantidade de energia refletida em alguns comprimentos de onda específicos, que apresentavam maior capacidade de estimar parâmetros culturais. A estimativa de vigor vegetativo através da relação entre a reflectância no infravermelho próximo (IVP) e no vermelho tem sido utilizada há quase 50 anos, tendo início com o trabalho desenvolvido por JORDAN (1969). Avanços nessa área levaram a constatação de que a predição do conteúdo de clorofila e de N na planta poderiam ser melhoradas com a utilização de comprimentos de onda no limiar entre o vermelho e o IVP. Esta porção do espectro entre 650 e 800 nm é conhecida como “red-edge” e é definida como o comprimento de onda com a maior taxa de variação da reflectância (HORLER et al., 1983).

Este comprimento de onda tem sido incluído nos sensores de dossel que visam governar a aplicação de N em tempo real, sendo largamente utilizados na Europa e nos Estados Unidos. No Brasil seu uso ainda é restrito a poucas culturas, devido à falta de estudos do seu desempenho em condições tropicais. Dentre os sensores de dossel disponíveis que utilizam o “red-edge”, destacam-se o Crop Circle® (Holland Scientific, Lincoln, NE, EUA) e o CropSpec™ (Topcon, Tokyo, Japão). A principal diferença conceitual entre os dois é que o primeiro foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar nas aplicações de fertilizantes nitrogenados de forma localizada, seguindo as fileiras da cultura, enquanto que o segundo objetiva as aplicações a lanço, em área total da cultura. Por isso o sensor Crop Circle é montado próximo à cultura, com visão ao nadir e uma faixa sensorizada estreita, em geral inferior a 1,0 m, enquanto que o sensor CropSpec utiliza de uma visão oblíqua do dossel da cultura e apresenta faixa sensorizada variando de 3 a 4 m.

Mesmo com a comprovação do bom desempenho dos sensores ativos de dossel em estimar o acúmulo de biomassa e nitrogênio pelas plantas, a decisão de quanto aplicar em cada situação ainda não está bem definida. Existem em geral duas linhas de pensamento distintas; a primeira recomenda que a dose aplicada deve ser maior quando o vigor vegetativo da cultura é menor, assumindo que a menor quantidade de nitrogênio acumulado nas plantas em relação a uma referência é causada principalmente pela incapacidade do solo em fornecer este nutriente, e, portanto, espera-se alta resposta à fertilização nitrogenada.

Por outro lado, sabe-se que nas condições de cultivo brasileiras, nem sempre o nitrogênio é o limitante à produtividade, o que leva à recomendação oposta, segunda a qual a dose aplicada deve ser maior quanto maior for o vigor vegetativo da cultura, assumindo que nesses locais existem menos fatores limitantes à produtividade, e,

portanto, a demanda de nitrogênio pela cultura é maior. Essa segunda forma de recomendação apresenta uma limitação importante, por não levar em conta a possibilidade de penalização da produção em função do excesso de nitrogênio, o que normalmente é observado no algodoeiro.

2.4. Experimentos ao nível de fazenda

Métodos convencionais de experimentação e análise estatística, baseados na condução de pequenas unidades experimentais e nos princípios de repetição, aleatorização e controle local, apresentam limitações para avaliar práticas que envolvem o gerenciamento da variabilidade espacial. A própria natureza da variabilidade espacial pode impor restrições aos princípios da estatística clássica, como a aleatorização e o controle local, uma vez que não é possível, por exemplo, alocar aleatoriamente parcelas com diferentes texturas de solo em uma área. PIEPHO et al. (2004) sugerem que sempre que possível, os fatores devem ser aleatorizados, e que quando isso não for possível, o modelo estatístico deve levar em consideração a autocorrelação espacial.

Graças aos avanços na tecnologia embarcada nas máquinas agrícolas, principalmente os receptores de navegação global por satélites (GNSS), os controladores de taxas variáveis e os sistemas de monitoramento da produtividade, um novo conceito de experimentação, chamada de experimentação ao nível de fazenda, tem sido cada vez mais difundido. Estes experimentos são constituídos por grandes parcelas ou faixas nas quais utiliza-se equipamentos para aplicação em taxas variáveis para implantação dos fatores sendo avaliados e os resultados são obtidos através do monitoramento das produtividades durante a colheita.

No caso de experimentos em grandes parcelas que seguem um delineamento clássico contemplando repetições, aleatorização e o controle local, os métodos convencionais podem ser usados para analisar as médias de cada parcela. Entretanto, pode-se esperar um ganho na confiabilidade dos resultados ao incluir-se covariáveis georreferenciadas que foram mensuradas em vários pontos em cada parcela, assumindo a existência de correlação entre essas observações (Piepho et al., 2011). Para que melhores resultados sejam obtidos é necessário que um modelo de dependência espacial adequado seja selecionado e que se utilize algumas modificações dos testes clássicos de diferença de médias. Além disso, RICHTER et al. (2015) reforçam que quanto mais pronunciada for a correlação espacial das observações, maiores são os ganhos de confiabilidade em utilizar-se métodos de análise espacial quando comparados aos resultados da análise estatística clássica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização dos locais

Para a instalação dos experimentos buscou-se locais que fossem representativos do sistema de produção de algodão de sequeiro no Brasil. Além disso, em função da necessidade de representar as condições reais de uma lavoura de algodão, foi necessário a consolidação de parcerias com produtores que permitiram que os protocolos de pesquisa fossem implantados em suas áreas de produção. Esses pré-requisitos justificam a implantação dos experimentos em áreas agrícolas do centro-oeste brasileiro (Figura 1).

Figura 1. Localização dos municípios onde foram realizados os experimentos em relação a localização da ESALQ em Piracicaba - SP.

Os experimentos foram conduzidos nas safras 2012/13 e 2013/14 em áreas comerciais de cultivo do algodoeiro localizadas em Chapadão do Céu – GO. O solo nessas áreas é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de textura predominante argilosa (EMBRAPA, 2013), onde adota-se o sistema de plantio direto, utilizando-se as culturas de soja ou feijão na primeira safra (Setembro – Janeiro) e a sucessão com algodão, milho ou sorgo na segunda safra (Janeiro – Julho).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo Aw, tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Apresenta pluviosidade média anual de 1750 mm, temperatura média anual de 22°C e altitude média de 840 m. Os dados diários de temperaturas máxima e mínima, além da precipitação pluvial durante o período de condução do experimento (Figura 2 e Figura 3), foram obtidos a partir de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalada em Chapadão do Sul – MS.

Figura 2. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2012/2013 em Chapadão do Céu – GO.

Figura 3. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2013/2014 em Chapadão do Céu – GO.

A escolha dos talhões levou em consideração todas as informações históricas disponíveis, principalmente imagens de satélite, mapas de produtividade e o conhecimento das áreas pelos profissionais envolvidos na produção. Nas duas safras em que os experimentos foram realizados nessa região utilizou-se um total de 6 talhões (Figura 4) que apresentavam diferentes características de solo e diferentes níveis de variabilidade espacial. A mudança das áreas de um ano para outro se fez necessária devido ao sistema de rotação de culturas adotado, segundo o qual o algodoeiro não é cultivado em duas safras consecutivas na mesma área.

Figura 4. Localização das áreas experimentais em Chapadão do Céu – GO.

Na safra 2014/15 os experimentos foram conduzidos no município de Campo Verde - MT, também em campos de produção comercial de algodão. A região se caracteriza por apresentar um clima tropical (Aw), com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com índice pluviométrico de 1726 mm ano^{-1} . A temperatura anual média é de $22,3^{\circ}\text{C}$ e a altitude média de 730 m. O solo nas áreas onde foram instalados os experimentos variou desde Latossolo Vermelho distrófico de textura predominante argilosa, até Neossolo Quartzarênico, com teor de argila inferior a 50 g kg^{-1} (EMBRAPA, 2013).

Nestas áreas adota-se o sistema de plantio direto, utilizando-se as culturas de soja ou feijão na primeira safra (Setembro – Janeiro) e a sucessão com algodão, milho ou braquiária na segunda safra (Janeiro – Julho). Os dados diários de temperaturas máxima e mínima, além da precipitação pluvial durante o período de condução do experimento (Figura 5), foram obtidos a partir de uma estação meteorológica do INMET instalada no município de Campo Verde – MT.

A mudança de região para instalação dos experimentos foi necessária devido à redução de áreas de algodão na região de Chapadão do Céu, em função da elevação do custo de produção pela elevada pressão de pragas, principalmente do bicudo do algodoeiro. Entretanto as características edafoclimáticas foram semelhantes e representativas das condições de cultivo do algodoeiro no centro-oeste brasileiro.

A escolha dos talhões levou em consideração todas as informações históricas disponíveis, principalmente imagens de satélite e o conhecimento das áreas pelos profissionais envolvidos na produção. Foram priorizadas áreas que apresentaram variabilidade espacial evidente e consistente ao longo dos anos, utilizando-se um total de três talhões (Figura 6), que apresentavam diferentes características de solo e diferentes níveis de variabilidade espacial.

Figura 5. Condições climáticas durante o cultivo do algodoeiro na safra 2014/2015 em Campo Verde - MT.

Figura 6. Localização das áreas experimentais em Campo Verde – MT.

3.2. Avaliação do desempenho dos sensores de dossel

Ao longo de duas safras foram utilizadas quatro áreas comerciais de produção de algodão para avaliar o desempenho dos sensores ativos de dossel em prever a altura de plantas e o acúmulo de biomassa e N no algodoeiro, considerando dois sistemas de produção (espaçamento convencional e adensado) e vários estágios de desenvolvimento da cultura (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das áreas experimentais utilizadas para avaliação do desempenho dos sensores em prever o acúmulo de biomassa e nitrogênio no algodoeiro, em Campo Verde – MT.

Talhão	TC1	TA1	TC3	TA3
Safra	2012/13	2012/13	2013/14	2013/14
Área (ha)	97,1	130,6	93,8	88,5
Espaçamento	0,80 m	0,45 m	0,80 m	0,45 m
Variedade	FM 975 WS	FM 975 WS	FM 975 WS	FM 975 WS
Emergência	18/12/12	13/01/13	08/01/14	23/01/14
População*	90000	140000	100000	190000
Textura	Argilosa	Argilosa	Média	Argilosa
Variabilidade	Baixa	Baixa	Média	Baixa

*População final de plantas estimada na colheita.

Foram utilizados dois conjuntos de sensores ópticos de dossel, montados no distribuidor de fertilizantes autopropelido Hércules 5.0 (Stara, Não-Me-Toque, Brasil). O sensor Crop Circle foi montado em suportes nas laterais da máquina, a 1,95 m de altura em relação ao solo e o sensor CropSpec foi instalado sobre a cabine, a uma altura de 4,00 m, com ângulo de inclinação em relação ao solo de 45° (Figura 7). Para coleta dos dados dos sensores a máquina percorreu toda a área a uma velocidade média de 5,5 m s⁻¹, com espaçamento de 30 m entre passadas.

Na safra 2012/2013 foram realizadas três avaliações em cada área (TC1 e TA1), aos 35, 50 e 85 DAE, obtendo-se os dados apenas do sensor CropSpec. Na safra 2013/2014 (Figura 8) também foram realizadas três avaliações em cada área, aos 38, 51 e 85 DAE na área de cultivo de algodão em espaçamento convencional (TC3) e aos 33, 51 e 72 DAE na área de cultivo de algodão adensado (TA3), obtendo-se os dados dos dois sensores de forma simultânea.

A partir da relação entre as reflectâncias das bandas espectrais de cada sensor, este fornece os valores do índice de vegetação da cultura que foram utilizados nas análises (Tabela 2). Os dados de índice de vegetação foram georreferenciados e coletados com frequência de 1 Hz. A partir da coordenada central registrada, projetou-se os valores individuais de cada lado do sensor para o centro do campo de visão deste, a fim de melhor representar a área sensoriada.

Figura 7. Locais de instalação dos sensores na máquina e campo de visada aproximado de cada sensor. Detalhes de como ficam as plantas observadas do mesmo ângulo que os sensores.

Figura 8. Visão geral das lavouras aos 38, 51 e 85 DAE no cultivo de algodão em espaçamento convencional e aos 33, 51 e 72 DAE no cultivo de algodão adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Tabela 2. Características técnicas dos dois sensores utilizados.

Especificação	Crop Circle ACS 430	CropSpec
Fabricante	Holland Scientific	Topcon
Fonte Luminosa	Matriz de LED policromática modulada	Diodo laser
Bandas Espectrais	670 nm (RED)	735 nm (RedEdge)
	730 nm (RedEdge)	808 nm (NIR)
	780 nm (NIR)	
Índice de vegetação	$(R780-R730) / (R780+R730)$	$100 * (R808 / R735 - 1)$
Altura do sensor	0,6 – 1,2 m	2 - 4 m
Ângulo de visada	45/10°	40° - 55°
Faixa sensoriada	0,5 - 1 m	2 - 4 m

Os mapas de índice de vegetação produzidos pelos sensores foram visualmente inspecionados e então utilizados para direcionar os 30 pontos amostrais de cada avaliação, a fim de abranger toda a amplitude dos dados registrados pelo sensor. Nesses pontos foram criadas parcelas virtuais contendo três fileiras de plantas por 1,0 m de comprimento. Obteve-se a altura média das plantas de cada parcela virtual e em seguida todas as plantas foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca. Parte das plantas foi então triturada para compor uma amostra de 250 g que foi seca em estufa a 65°C até peso constante para determinação da percentagem de matéria seca. As amostras secas foram então enviadas ao Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ/USP para determinação do conteúdo de N usando o método do semi-micro Kjeldahl, por meio de digestão sulfúrica, destilação e titulação com ácido sulfúrico diluído (SARRUGE e HAAG, 1974). A partir desses resultados obteve-se a quantidade total de N acumulado na cultura.

A análise descritiva inicial dos dados coletados mostrou que estes apresentavam grande assimetria, com concentração de valores pequenos e alta dispersão nos valores maiores. Buscando atender os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, estes foram submetidos à transformação logarítmica antes das análises. Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando-se um modelo que relaciona a característica da cultura sendo estimada com o valor fornecido pelo sensor, considerando as possíveis interações com o estágio fenológico da cultura e o sistema de espaçamento entre linhas utilizado. A predição realizada pela regressão linear levou em consideração as interações significativas.

A fim de facilitar a compreensão, para apresentação dos resultados na forma gráfica, foram utilizados os resultados sem transformação, usando-se os dois eixos em escala logarítmica. O valor de raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) apresentado nos gráficos também está apresentado na escala original dos dados, sendo obtido pela aplicação da transformação inversa nos resíduos da regressão linear. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando-se o software R, versão 3.1.3 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015).

3.3. Avaliação da resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada

Ao longo de duas safras foram instalados cinco experimentos para calibração das curvas de dose resposta do algodoeiro ao nitrogênio em cobertura em diferentes condições de desenvolvimento da cultura (Tabela 3). O objetivo desses experimentos foi o de avaliar a resposta do algodoeiro ao N aplicado em cobertura em diferentes condições de solo ou de histórico de produtividades no mesmo talhão. Assim, foram utilizados recursos de levantamento da variabilidade espacial das áreas como imagens de satélite, mapas de produtividade e de

condutividade elétrica do solo para direcionar a alocação das parcelas nos talhões. As regiões de um talhão, delimitadas com base nessas informações e que apresentam características de solo e produtividade ao longo dos anos semelhantes entre si e distintas do restante do talhão, podem ser chamadas de unidades de gerenciamento diferenciadas (UGD). As UGD podem ser utilizadas para inferir sobre a capacidade ou potencial produtivo do solo relativo àquele talhão e condições, por isso adota-se o termo capacidade produtiva relativa do solo para indicar que historicamente determinada região do talhão apresenta produtividades maiores ou menores que outras partes do mesmo talhão.

Tabela 3. Caracterização das áreas experimentais utilizadas para calibração das curvas de dose resposta do algodoeiro ao nitrogênio em cobertura.

Talhão	TC3	TA3	TC4	TC5	TA4
Local*	CHC	CHC	CPV	CPV	CPV
Safra	2013/14	2013/14	2014/15	2014/15	2014/15
Área (ha)	93,8	88,5	139,7	142,3	203,4
Cultura anterior	Feijão	Soja	Soja	Soja	Soja
Espaçamento	0,80 m	0,45 m	0,76 m	0,76 m	0,45 m
Variedade	FM 975 WS	FM 975 WS	DP 1243 B2RF	TMG 81 WS	TMG 81 WS
Emergência	08/01/14	23/01/14	07/01/15	17/01/15	22/01/15
População**	100000	190000	95000	100000	205000
Textura	Média	Argilosa	Argilosa	Arenosa	Arenosa
Variabilidade	Média	Baixa	Média	Média	Alta
Doses de N	5 (0 - 160)	5 (0 - 160)	6 (0 - 250)	6 (0 - 250)	6 (0 - 280)
Fontes de N***	27-00-00	33-00-00	40%: SA	40%: SA	40%: SA
			60%: Ureia	60%: Ureia	60%: Ureia
Aplicações	40 DAE	33 DAE	32 e 58 DAE	27 e 53 DAE	22 e 48 DAE

*CHC: Chapadão do Céu – GO; CPV: Campo Verde – MT. **População final de plantas estimada na colheita. ***SA: Sulfato de Amônio.

De acordo com os recursos disponíveis para cada área, utilizou-se diferentes camadas de informação para a alocação das parcelas em UGD. Tem-se como exemplo o procedimento adotado no talhão TA4, que semelhante a maior parte das áreas agrícolas no Brasil não possui histórico de mapeamento de produtividade das culturas. Nesse caso a principal fonte de informação utilizada para inferir sobre a estabilidade temporal da variabilidade espacial foi um conjunto de imagens obtidas por sensoriamento remoto orbital, do satélite LANDSAT 5. Considerou-se imagens que refletem as mudanças de utilização do solo desde 1988, quando a área ainda era ocupada pela vegetação nativa de cerrado, sendo convertida para pastagem e depois cultivo de grãos e fibras.

Figura 9. Composições coloridas com as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM a bordo do satélite LANDSAT 5. Imagens obtidas em 17/01/1988 (Cerrado nativo), 16/02/1999 (Pastagem), 07/05/2005 (Cobertura com milho) e 10/01/2009 (Soja).

Além das imagens, utilizou-se o mapa de condutividade elétrica do solo (CE), que foi obtida com o sistema sensor Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, KA, EUA). Os dados de CE foram obtidos pelo mapeamento da área no dia anterior à semeadura, utilizando largura das faixas de 12 m, velocidade de 4 m s⁻¹ e taxa de aquisição de 1 Hz. Os dados coletados referem-se a CE na camada de 0 – 0,3 m e foram georreferenciados com auxílio de um receptor de navegação global por satélites (GNSS), o que produziu cerca de 200 pontos ha⁻¹, que foram então interpolados por krigagem ordinária e representados na forma de mapa de polígonos (Figura 10). Resultados de análises do solo em cada UGD revelaram que a principal fator causando as diferenças observadas nas imagens de satélite e no mapa de condutividade elétrica é o teor de argila do solo (Tabela 4. Resultado de análise do solo a partir de amostras coletadas antes da instalação dos experimentos no TA4, cultivado com algodoeiro na safra 2014/2015, em Campo Verde – MT. Tabela 4). Observa-se também que a acidez do solo está elevada para o cultivo do algodoeiro, podendo limitar as produtividades.

Observa-se que as regiões mais verdes nos mapas de vegetação correspondem às regiões com maiores valores de CE, evidenciando que nesses locais o solo apresenta maior capacidade de retenção de água e nutrientes, o que se reflete em maior desenvolvimento vegetativo das plantas. Por outro lado, as plantas sempre apresentaram baixo desenvolvimento vegetativo nas regiões com baixa condutividade elétrica, como as manchas ao norte e oeste no mapa do talhão. As parcelas experimentais foram alocadas de acordo com essas variações, de modo a representar regiões contrastantes do talhão, a fim de obter-se a dose de máximo retorno econômico para o N aplicado em cobertura em cada UGD.

Figura 10. Mapa de condutividade elétrica aparente do solo e da localização das parcelas experimentais no talhão TA4, cultivado com algodoeiro na safra 2014/2015, em Campo Verde – MT.

Tabela 4. Resultado de análise do solo a partir de amostras coletadas antes da instalação dos experimentos no TA4, cultivado com algodoeiro na safra 2014/2015, em Campo Verde – MT.

UGD	Profundidade	Areia	Silte	Argila	MOS	P Resina	S	K	Ca	Mg	Al	CTC	pH CaCl2	V
		g kg ⁻¹				mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³				-		%
Alta	0-20	817	34	149	15	37	12	1.2	11	2	2	36.2	4.6	39
	20-40	811	12	177	8	10	51	1.5	5	2	2	26.5	4.5	32
Média	0-20	880	20	100	18	39	4	1.6	11	2	2	36.6	4.6	40
	20-40	868	32	100	7	6	8	1.3	4	1	2	24.3	4.6	26
Baixa	0-20	929	21	50	16	44	5	0.7	7	1	3	36.7	4.3	24
	20-40	931	18	51	9	16	15	0.6	4	1	5	33.6	4.1	17

Apesar do objetivo ser o mesmo, o protocolo utilizado precisou ser adaptado para respeitar as condições de cada experimento. No talhão TC3 a semeadura foi realizada no dia 08/01/2014, em sistema de semeadura direta sobre palhada de feijão que foi cultivado de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975 WS, com

espaçamento entre fileiras de 0,80 m e população final de aproximadamente de 100.000 plantas ha^{-1} . A adubação fosfatada de base na linha de semeadura foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 150 kg ha^{-1} de Fosfato Monoamônico - MAP (11-52-00). As plantas emergiram no dia 13/01/2014 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a aplicação em superfície e a lanço de 150 kg ha^{-1} de KCl (60% K_2O). A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada aos 40 DAE (Figura 11), com a distribuição do fertilizante Yarabela™ (27% N), também em superfície e a lanço. Adotou-se o delineamento experimental de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas com três níveis do fator capacidade produtiva relativa do solo (alta, média e baixa), cinco níveis do fator dose de nitrogênio (0, 40, 80, 120 e 160 kg N ha^{-1}) e três repetições, totalizando 45 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de seis fileiras espaçadas de 0,80 m, com 10,0 m de comprimento.

Aos 85 DAE obteve-se a altura média das plantas de cada parcela e em seguida as plantas presentes em 1,5 m de comprimento das três fileiras centrais foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca. Parte das plantas foi então triturada para compor uma amostra de 250 g que foi seca em estufa a 65°C até peso constante para determinação da percentagem de matéria seca. As amostras secas foram então enviadas ao Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da USP/ESALQ para determinação do conteúdo de N. A partir desses resultados obteve-se a quantidade total de N acumulado na cultura. Aos 215 DAE realizou-se a colheita manual do algodão em caroço para obter-se a produtividade das parcelas. Adotou-se como área útil as três fileiras centrais, com 5,0 m de comprimento.

Figura 11. Demarcação das parcelas e aplicação do N em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.

No talhão TA3 a semeadura foi realizada no dia 18/01/2014, em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975 WS, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e população final de aproximadamente de 190.000 plantas ha^{-1} . A adubação fosfatada de base na linha de semeadura foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 190 kg ha^{-1} de MAP (11-52-00). As plantas emergiram no dia 23/01/2014 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a aplicação de 150 kg ha^{-1} de KCl (60% K_2O) em superfície e a lanço. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada aos 33 DAE com a distribuição em superfície e a lanço do fertilizante NPK 33-00-00 + 12% S, que é formulado a partir da mistura de iguais proporções de Sulfato de Amônio e Ureia. Em função da baixa variabilidade observada na área não foi possível estabelecer regiões com capacidade produtiva relativa do solo diferentes. Por isso adotou-se o delineamento experimental em quadrado latino com cinco

níveis do fator dose de nitrogênio (0, 40, 80, 120 e 160 kg N ha⁻¹) e cinco repetições, totalizando 25 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de 10 fileiras de 0,45 m, com 10,0 m de comprimento.

Aos 72 DAE obteve-se a altura média das plantas de cada parcela e em seguida as plantas presentes em 1,5 m de comprimento das quatro fileiras centrais foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca, adotando-se a mesma metodologia descrita anteriormente. Aos 195 DAE realizou-se a colheita manual do algodão em caroço para obter-se a produtividade das parcelas. Adotou-se como área útil as quatro fileiras centrais, com 5,0 m de comprimento.

A semeadura foi realizada no dia 02/01/2015 para o TC4, em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja, que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão DP 1243 B2RF, com espaçamento entre fileiras de 0,76 m e população final de aproximadamente de 95.000 plantas ha⁻¹. A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura com haste sulcadora utilizando-se 100 kg ha⁻¹ do formulado NPK 12-46-00 + 7% S. As plantas emergiram no dia 07/01/2015 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a aplicação de 150 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O) em superfície e a lanço. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada aos 32 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de Sulfato de Amônio (21% N), em dose equivalente a 40% do total de N em cobertura de cada parcela, seguida pela aplicação do restante da dose de N aos 58 DAE, utilizando-se como fonte a Ureia (45% N).

Adotou-se o delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial com três níveis do fator capacidade produtiva relativa do solo (alta, média e baixa), seis níveis do fator dose de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg N ha⁻¹) e três repetições, totalizando 54 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de oito fileiras de 0,76 m, com 10,0 m de comprimento. Aos 84 DAE obteve-se a altura média das plantas de cada parcela e em seguida as plantas presentes em 3,0 m de comprimento das três fileiras centrais foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca, adotando-se a mesma metodologia descrita anteriormente. Aos 200 DAE realizou-se a colheita manual do algodão em caroço para obter-se a produtividade das parcelas. Adotou-se como área útil as três fileiras centrais, com 3,0 m de comprimento.

No talhão TC5 a semeadura foi realizada no dia 12/01/2015, também em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão TMG 81 WS, com espaçamento entre linhas de 0,76 m e população final desejada de 120.000 plantas ha⁻¹. A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura utilizando-se 100 kg ha⁻¹ do formulado NPK 12-46-00 + 7% S. As plantas emergiram no dia 17/01/2015, com população final de aproximadamente de 100.000 plantas ha⁻¹, devido a morte de plântulas pela incidência de doenças. A adubação potássica de cobertura foi parcelada em duas etapas, com aplicações em superfície e a lanço aos 25 DAE e 50 DAE, utilizando-se em cada aplicação 75 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O). A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada aos 27 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de Sulfato de Amônio (21% N) em dose equivalente a 40% do total de N em cobertura de cada parcela, seguida pela aplicação do restante da dose de N aos 53 DAE, utilizando-se como fonte a Ureia (45% N).

Adotou-se o delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial com três níveis do fator capacidade produtiva relativa do solo (alta, média e baixa), seis níveis do fator dose de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg N ha⁻¹) e três repetições, totalizando 54 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de oito fileiras de 0,76 m, com 10,0 m de comprimento. Aos 74 DAE obteve-se a altura média das plantas de cada parcela e em seguida as plantas presentes em 3,0 m de comprimento das três fileiras centrais foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca, adotando-se a mesma metodologia descrita

anteriormente. Aos 190 DAE realizou-se a colheita manual do algodão em caroço para obter-se a produtividade das parcelas. Adotou-se como área útil as três fileiras centrais, com 3,0 m de comprimento.

No talhão TA4 a semeadura foi realizada no dia 17/01/2015, também em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão TMG 81 WS, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e população final desejada de 210.000 plantas ha⁻¹. A adubação fosfatada foi realizada em superfície e a lanço, um dia após a semeadura, utilizando-se 100 kg ha⁻¹ do formulado NPK 12-46-00 + 7% S. As plantas emergiram no dia 22/01/2015, com população final de aproximadamente 205.000 plantas ha⁻¹. A adubação potássica de cobertura foi parcelada em duas etapas, utilizando-se 75 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O) em cada aplicação, em superfície e a lanço, aos 25 DAE e 50 DAE. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada aos 22 DAE com a distribuição de Sulfato de Amônio (21% N) com dose equivalente a 40% do total de N em cobertura de cada parcela, seguida pela aplicação do restante da dose de N aos 48 DAE, utilizando-se como fonte a Ureia (45% N), aplicado em superfície e a lanço.

Adotou-se o delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial com três níveis do fator capacidade produtiva relativa do solo (alta, média e baixa), seis níveis do fator dose de nitrogênio (0, 56, 112, 168, 224 e 280 kg N ha⁻¹) e três repetições, totalizando 54 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de 12 fileiras de 0,45 m, com 10,0 m de comprimento. Aos 69 DAE obteve-se a altura média das plantas de cada parcela e em seguida as plantas presentes em 4,0 m de comprimento das três fileiras centrais foram cortadas próximo ao solo e pesadas para a obtenção da massa fresca, adotando-se a mesma metodologia descrita anteriormente. Aos 180 DAE realizou-se a colheita manual do algodão em caroço para obter-se a produtividade das parcelas. Adotou-se como área útil as três fileiras centrais, com 4,0 m de comprimento.

Em todas as áreas experimentais as condições climáticas foram adequadas ao desenvolvimento da cultura e foram observadas chuvas de pelo menos 20 mm em no máximo 48 h após cada aplicação de N, favorecendo o bom aproveitamento do N aplicado. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário, inclusive as aplicações de regulador de crescimento, não sofreram variações entre os tratamentos, mantendo-se as atividades usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A análise estatística dos resultados foi realizada de forma independente para os dados de cada experimento e consistiu da análise de variância de acordo com o delineamento descrito, seguido pelo desdobramento das interações quando estas foram significativas e da análise de regressão linear quando o fator dose apresentou efeito significativo. Os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando-se o software R, versão 3.3.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016).

3.4. Desenvolvimento dos algoritmos para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real

A metodologia de desenvolvimento dos algoritmos para aplicação em taxas variáveis em tempo real foi baseada no conceito de redistribuição das doses de N dentro do talhão, ou seja, os dados do sensor não são utilizados para determinar a demanda absoluta das plantas, mas sim a demanda relativa a uma média pré-estabelecida pelo responsável pela recomendação do fertilizante.

De maneira simplificada, o objetivo do algoritmo é converter os valores de reflectância ou do índice de vegetação fornecidos pelo sensor em um valor de dose de fertilizante que proporcione o maior retorno do investimento em cada parte do talhão. A primeira etapa nesse processo é transformar o índice de vegetação do

sensor em um valor de N acumulado pela parte aérea da cultura, o que é feito utilizando os resultados obtidos na etapa de calibração e validação do desempenho dos sensores. O valor médio do N acumulado é obtido em tempo real durante a aplicação a partir da distribuição de frequência acumulada dos valores observados em cada ponto. Essa média vai sendo atualizada e tornando-se cada vez mais robusta a medida que mais área é aplicada e mais dados são coletados.

A diferença entre a quantidade de N acumulado por determinado ponto e o valor médio do talhão é a única parte do algoritmo que varia a cada novo dado coletado pelo sensor e transmite a ideia de estado nutricional relativo daquele local. Esse valor deve então ser multiplicado por um fator que dá o formato da inclinação do algoritmo quando observado em um gráfico e representa a estratégia de redistribuição adotada, que pode ser negativo (-1) ou positivo (+1). Se a inclinação for negativa, a dose aplicada será maior quando o vigor vegetativo da cultura é menor, assumindo que a menor quantidade de nitrogênio acumulado nas plantas em relação a uma referência é causada principalmente pela incapacidade do solo em fornecer este nutriente e, portanto, espera-se alta resposta à fertilização nitrogenada. Se a inclinação for positiva, assume-se que o nitrogênio não é o principal limitante à produtividade, de modo que a dose aplicada será maior quanto maior for o vigor vegetativo da cultura, considerando que nesses locais existem menos fatores limitantes à produtividade e, portanto, a demanda de nitrogênio pela cultura é maior. Esse valor que representa o déficit ou excesso relativo de N deverá ainda ser multiplicado por um fator de correção, que representa o aproveitamento do fertilizante pelas plantas, e está relacionado principalmente à fonte do fertilizante, condições climáticas e estado da cultura. Esse valor normalmente varia de 1 a 3 e deve ser maior quando a fonte utilizada e as condições climáticas favorecem as perdas por volatilização ou lixiviação. Em seguida, é necessário fornecer a informação da taxa média de aplicação desejada, que será somada ao valor relativo obtido em cada ponto (eq. 1).

Deve-se também fornecer os valores de taxa mínima e máxima da aplicação, pois os controladores utilizados para aplicação em taxa variável tem limitações na amplitude da variação e além disso nos casos de distribuição em superfície e a lanço, variações muito grandes na taxa de aplicação podem comprometer a qualidade e a uniformidade da distribuição (eq. 2)

O último parâmetro necessário para definir a taxa de aplicação refere-se a um limite de corte abaixo do qual a aplicação é suspensa. Esse limite é necessário para evitar a aplicação em locais sem chance de aproveitamento do N aplicado, como por exemplo em falhas de semeadura ou reboleiras onde as plantas morreram por ataque de pragas ou doenças. Para definir esse valor pode-se observar o valor fornecido pelo sensor em um local que as plantas apresentam baixo vigor, mas que ainda existe potencial de resposta a aplicação de N, e compará-lo com o valor obtido em uma falha ou uma estrada por exemplo. Normalmente áreas onde o valor de N acumulado for inferior a 20% do valor médio de N acumulado no talhão podem ser tratadas como áreas sem potencial de resposta a aplicação de N e esse valor pode ser utilizado como limite de corte (eq. 3). Todo o procedimento descrito acima pode ser representado matematicamente nas equações abaixo:

$$Rx = Tx_{Média} + (N_{AccAtual} - N_{AccMédio}) * Inc * f \quad (1)$$

$$Rx = \begin{cases} Tx_{Mínima} & \text{Se } Rx < Tx_{mínima} \\ Rx & \text{Se } Tx_{mínima} \leq Rx \leq Tx_{Máxima} \\ Tx_{Máxima} & \text{Se } Rx > Tx_{Máxima} \end{cases} \quad (2)$$

$$Rx = \begin{cases} 0 & \text{Se } N_{AccAtual} < 0,2 * N_{AccMédio} \\ Rx & \text{Se } N_{AccAtual} \geq 0,2 * N_{AccMédio} \end{cases} \quad (3)$$

Onde: R_x é a taxa de aplicação de N em cada ponto (kg ha^{-1}); N_{AccAtual} é o valor de N acumulado estimado pelo sensor em cada ponto (kg ha^{-1}); $N_{\text{AccMédio}}$ é o valor de N acumulado médio do talhão estimado pelo sensor (kg ha^{-1}); Inc é o fator que representa a inclinação principal do algoritmo (1 ou -1); f é o fator que representa a eficiência de aproveitamento do N fertilizante pelas plantas; $T_{x\text{Máxima}}$ e $T_{x\text{Mínima}}$ são, respectivamente, os valores máximos e mínimos de taxa de aplicação permitidos.

3.5. Validação dos algoritmos para redistribuição das doses de nitrogênio

Para a avaliação e validação dos algoritmos que foram desenvolvidos para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real, adotou-se o conceito de experimentos ao nível de fazenda. Estes experimentos são constituídos por grandes parcelas ou faixas nas quais utiliza-se equipamentos para aplicação em taxas variáveis para implantação dos fatores sendo avaliados e os resultados são obtidos através do monitoramento das produtividades durante a colheita. Ao todo foram realizados quatro experimentos, sendo dois na safra 2013/14 em Chapadão do Céu - GO e dois na safra 2014/15 em Campo Verde – MT. Em cada safra avaliou-se uma área de algodão cultivado em espaçamento convencional e outra de algodão cultivado em espaçamento adensado (Tabela 5).

Tabela 5. Caracterização das áreas experimentais utilizadas na validação dos algoritmos para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real.

Talhão	TC2	TA2	TC4	TA4
Local*	CHC	CHC	CPV	CPV
Safra	2013/14	2013/14	2014/15	2014/15
Área (ha)	153,8	92,5	139,7	203,4
Espaçamento	0,80 m	0,45 m	0,76 m	0,45 m
Variedade	FM 975 WS	FM 975 WS	DP 1243 B2RF	TMG 81 WS
Emergência	1/4/2014	1/20/2014	07/01/15	22/01/15
População**	100.000	190.000	95.000	205.000
Textura	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Arenoso
Variabilidade	Baixa	Baixa	Média	Alta
Fontes de N***	27-00-00	33-00-00	SA, Ureia e Ureia	SA, SA, Ureia e Ureia
Aplicações (DAE)	15, 40 e 60	18, 35 e 51	22, 50 e 58	21, 36, 48 e 60
Dose média de N (Kg ha^{-1})	21, 30 e 30 81	30, 35 e 35 100	62, 45 e 45 152	31, 31, 45 e 45 152

*CHC: Chapadão do Céu – GO; CPV: Campo Verde – MT. **População final de plantas estimada na colheita. ***SA: Sulfato de Amônio.

Em cada área foram avaliadas quatro estratégias diferentes de fertilização nitrogenada. O T1 equivale ao controle ou prática mais adotada atualmente, e consistiu da aplicação de uma taxa fixa de N de acordo com o planejado para a cultura. O T2 consistiu da aplicação de N em taxa variável de acordo com as informações fornecidas pelo sensor ativo de dossel, utilizando-se um algoritmo com inclinação negativa, segundo o qual áreas com maior vigor apresentam nível nutricional adequado em relação ao N e por isso recebem doses menores de N enquanto que áreas menos vigorosas estão deficientes em N e por isso recebem doses maiores de N, mantendo-se a mesma dose média empregada na aplicação em taxa fixa. O T3 consistiu da aplicação de N em taxa variável de acordo com as informações fornecidas pelo sensor ativo de dossel, utilizando-se um algoritmo com inclinação positiva, segundo o qual áreas com maior vigor apresentam maior potencial de resposta e por isso recebem doses

maiores de N enquanto que áreas menos vigorosas apresentam menor potencial produtivo e menores chances de reposta, e por isso recebem doses menores de N, mantendo-se a mesma dose média empregada na aplicação em taxa fixa. O T4 consistiu da aplicação de N em taxa variável de acordo com as informações fornecidas pelo sensor ativo de dossel, combinando-se os dois algoritmos anteriores em momentos diferentes da cultura, de forma a fornecer mais N e estimular o desenvolvimento das plantas menos vigorosas no início do desenvolvimento da cultura, utilizando o algoritmo com inclinação negativa, e de fornecer mais N as plantas com maior vigor e maior potencial produtivo na última aplicação, realizada na fase reprodutiva da cultura, também mantendo a mesma dose média empregada na aplicação em taxa fixa.

Novamente foram necessárias algumas adaptações no protocolo geral a fim de respeitar as condições de cada experimento. No talhão TC2 a semeadura foi realizada no dia 29/12/2013, em sistema de semeadura direta sobre palhada de feijão que foi cultivado de setembro a dezembro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975 WS, com espaçamento entre fileiras de 0,80 m e população final de aproximadamente de 100.000 plantas ha⁻¹. A adubação fosfatada de base, na linha de semeadura, foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 150 kg ha⁻¹ de Fosfato Monoamônico - MAP (11-52-00). As plantas emergiram no dia 13/01/2014 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a aplicação em superfície e a lanço de 150 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O). A adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada em três aplicações, sendo a primeira realizada aos 15 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de uma dose fixa de 80 kg ha⁻¹ do fertilizante Yarabela™ (27% N), em todos os tratamentos. O restante do N em cobertura foi aplicado aos 40 e 60 DAE, em taxa variável de acordo com cada tratamento, com dose média de 100 kg ha⁻¹ do fertilizante Yarabela™ (27% N), em cada aplicação. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário foram as usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A colheita foi realizada aos 220 DAE, utilizando-se colhedoras modelo 7760 Cotton Picker (John Deere, Moline, IL, EUA), equipadas com sistema de monitoramento de produtividade Harvest Doc™. O sistema utiliza sensores de micro-ondas para mensurar o fluxo de algodão nos ductos de cada uma das 6 linhas da máquina, gerando um valor médio de fluxo de algodão a cada segundo, que são transformados em dados de produtividade georreferenciados utilizando um receptor GNSS com tecnologia de correção Real Time Kinematic (RTK). A velocidade média de deslocamento na colheita foi de 2 m s⁻¹, o que gerou cerca de 1.000 pontos de produtividade por hectare. Cada unidade experimental foi constituída de 2 vezes a largura de aplicação do fertilizante nitrogenado, totalizando 60 m, com comprimento de 1150 m, sendo que para as análises foram desconsideradas as bordaduras, resultando numa área útil de 30 m de largura por 1100 m de comprimento. Todos os dados foram regularizados para representar polígonos de 5 X 15 m, totalizando cerca de 130 valores por hectare. Cada tratamento foi repetido em 4 faixas, num delineamento de blocos casualizados.

Figura 12. Detalhes da colhedora de algodão tipo Picker e do sistema de monitoramento de produtividade utilizados na colheita da área experimental: a) Unidade de colheita; b) Receptor GNSS; c) Monitor GS3; d) Sensor de micro-ondas do fluxo de algodão.

No talhão TA2 a semeadura foi realizada no dia 15/01/2014, em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975 WS, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e população final de aproximadamente de 190.000 plantas ha^{-1} . A adubação fosfatada de base na linha de semeadura foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 190 kg ha^{-1} de MAP (11-52-00). As plantas emergiram no dia 20/01/2014 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a aplicação de 150 kg ha^{-1} de KCl (60% K_2O) em superfície e a lanço. A adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada em três aplicações, sendo a primeira realizada aos 18 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de uma dose fixa em todos os tratamentos de 90 kg ha^{-1} do fertilizante NPK 33-00-00 + 12% S, que é formulado a partir da mistura de iguais proporções de Sulfato de Amônio e Ureia. O restante do N em cobertura foi aplicado aos 35 e 51 DAE, em taxa variável de acordo com cada tratamento, utilizando-se como fonte o mesmo fertilizante da primeira aplicação, com dose média de 105 kg ha^{-1} em cada aplicação. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário foram as usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A colheita foi realizada aos 200 DAE, utilizando-se colhedoras modelo 7760 Cotton Picker (John Deere, Moline, IL, EUA), equipadas com unidades de colheita do tipo VRS (Variable-Row-Spacing) que são adaptadas para colheita de algodão adensado. O sistema de monitoramento de produtividade utilizado foi o mesmo sistema descrito para o talhão TC2. Cada unidade experimental foi constituída de 2 vezes a largura de aplicação do fertilizante nitrogenado, totalizando 60 m, com comprimento de 950 m, sendo que para as análises foram desconsideradas as bordaduras, resultando numa área útil de 30 m de largura por 900 m de comprimento. Todos os dados foram regularizados para representar polígonos de 5 X 15 m, totalizando cerca de 130 valores por hectare. Cada tratamento foi repetido em 4 faixas, num delineamento de blocos casualizados.

A semeadura foi realizada no dia 02/01/2015 para o TC4, em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja, que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão DP 1243 B2RF, com espaçamento entre fileiras de 0,76 m e população final de aproximadamente de 95.000 plantas ha^{-1} . A adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura com haste sulcadora utilizando-se 100 kg ha^{-1} do formulado NPK 12-46-00 + 7% S. As plantas emergiram no dia 07/01/2015 e aos 25 DAE foi realizada a adubação potássica de cobertura, com a

aplicação de 150 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O) em superfície e a lanço. A adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada em três aplicações, sendo a primeira realizada aos 22 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de uma dose fixa de 300 kg ha⁻¹ de Sulfato de Amônio (21% N) em todos os tratamentos. O restante do N em cobertura foi aplicado aos 50 e 58 DAE, em taxa variável de acordo com cada tratamento, com dose média de 100 kg ha⁻¹ de Ureia (45% N) em cada aplicação. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário foram as usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A colheita foi realizada aos 200 DAE, utilizando-se o mesmo conjunto de equipamentos descrito para o talhão TC2. Cada unidade experimental foi constituída de 3 vezes a largura de aplicação do fertilizante nitrogenado, totalizando 72 m, com comprimento de 700 m, sendo que para as análises foram desconsideradas as bordaduras, resultando numa área útil de 48 m de largura por 650 m de comprimento. Todos os dados foram regularizados para representar polígonos de 5 X 12 m, totalizando cerca de 160 valores por hectare. Cada tratamento foi repetido em 5 faixas, num delineamento de blocos casualizados.

No talhão TA4 a semeadura foi realizada no dia 17/01/2015, também em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão TMG 81 WS, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e população final desejada de 210.000 plantas ha⁻¹. A adubação fosfatada foi realizada em superfície e a lanço, um dia após a semeadura, utilizando-se 100 kg ha⁻¹ do formulado NPK 12-46-00 + 7% S. As plantas emergiram no dia 22/01/2015, mantendo população final de aproximadamente 205.000 plantas ha⁻¹. A adubação potássica de cobertura foi parcelada em duas etapas, utilizando-se 75 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O) em cada aplicação, em superfície e a lanço, aos 25 DAE e 50 DAE. A adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada em quatro aplicações, sendo a primeira realizada aos 21 DAE com a distribuição em superfície e a lanço de uma dose fixa de 150 kg ha⁻¹ de Sulfato de Amônio (21% N) em todos os tratamentos. Aos 36 DAE realizou-se a segunda aplicação de N em cobertura, com a distribuição em superfície e a lanço de uma dose média de 150 kg ha⁻¹ de Sulfato de Amônio (21% N), em taxa variável de acordo com cada tratamento. O restante do N em cobertura foi aplicado aos 48 e 60 DAE, em taxa variável de acordo com cada tratamento, com dose média de 100 kg ha⁻¹ de Ureia (45% N) em cada aplicação. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário foram as usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A colheita foi realizada entre os 180 e 200 DAE, utilizando-se colhedoras modelo 9965 Cotton Picker (John Deere, Moline, IL, EUA), adaptadas com sistema Busa modelo Pente (Plataforma Stripper) com largura de corte de 6 m (STP 600). Para o monitoramento da produtividade utilizou-se um sistema de monitoramento de produtividade de algodão (AgLeader Technology, Ames, IA, EUA), que utiliza um conjunto de sensores ópticos para mensurar o fluxo de algodão nos dois ductos laterais da máquina, gerando um valor médio de fluxo de algodão a cada dois segundos, que são transformados em dados de produtividade georreferenciados utilizando um receptor GNSS com tecnologia de correção RTK (Figura 13). A velocidade média de deslocamento na colheita foi de 1 m s⁻¹, o que gerou cerca de 1.000 pontos de produtividade por hectare. Cada unidade experimental foi constituída de 3 vezes a largura de aplicação do fertilizante nitrogenado, totalizando 72 m, com comprimento de 750 m, sendo que para as análises foram desconsideradas as bordaduras, resultando numa área útil de 48 m de largura por 700 m de comprimento. Todos os dados foram regularizados para representar polígonos de 5 X 12 m, totalizando cerca de 160 valores por hectare. Cada tratamento foi repetido em 4 faixas, em um delineamento de blocos casualizados.

Figura 13. Detalhes da colhedora de algodão adaptada com plataforma tipo Stripper e do sistema de monitoramento de produtividade utilizados na colheita da área experimental: a) Receptor GNSS; b) Monitor Insight; c) Sensor óptico do fluxo de algodão; d) Plataforma tipo pente;

Em todas as áreas experimentais as condições climáticas foram adequadas ao desenvolvimento da cultura e foram observadas chuvas de pelo menos 20 mm em no máximo 48 h após cada aplicação de N, favorecendo o bom aproveitamento do N aplicado. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário, inclusive as aplicações de regulador de crescimento, não sofreram variações entre os tratamentos, mantendo-se as atividades usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

Na análise estatística dos dados coletado nos experimentos em faixas, buscou-se selecionar o modelo mais adequado às características dos dados, considerando-se a natureza espacial dos dados, assumir a independência entre as observações e utilizar métodos de estatística clássica poderiam não ser adequados. Diante disso, o modelo estatístico adotado testou a existência de efeito dos tratamentos, considerando a condutividade elétrica do solo como uma covariável representando a variabilidade espacial do solo e ainda uma matriz de variância-covariância espacial, que foi ajustada pelo método da máxima verossimilhança. Os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando-se o software R, versão 3.3.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016).

3.6. Avaliação do potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura

A partir da análise da influência das interações entre cultivares, espaçamentos, populações e estádios fenológicos no desempenho dos sensores em prever a altura e o acúmulo de biomassa no algodoeiro, decidiu-se estabelecer um procedimento genérico para definição da variação das doses de fitorreguladores a serem aplicadas em determinado momento da cultura. Esse modelo deve ser calibrado para cada situação, pois criar um modelo global de algoritmo de recomendação que leve em consideração todas essas interações exigiria maior quantidade de informações e apresenta pequena chance de sucesso.

O procedimento adotado afim de calibrar o modelo para cada situação foi semelhante ao adotado para avaliar o desempenho dos sensores. Assim, as aplicações foram baseadas em um mapa de prescrição criado a partir dos mapas de índice de vegetação produzidos pelos sensores, não sendo realizadas aplicações em taxas variáveis em tempo real como no caso do N. Após a elaboração do mapa de índice de biomassa, foram escolhidos ao menos cinco locais que representassem condições distintas de vigor da cultura. Em cada local, mediu-se a altura das plantas, o tamanho dos cinco últimos internódios e do número de nós, e, associando-se essas informações ao conhecimento da exigência de regulador de crescimento de cada cultivar e das condições climáticas nos últimos dias, definiu-se a dose de fitorregulador a ser aplicado em cada condição. Com esses valores, ajustou-se uma equação linear que relaciona cada valor de índice de vegetação do sensor a uma dose de fitorregulador, e essa equação foi utilizada para criar o mapa de prescrição de cada aplicação.

O mapa de prescrição precisou ainda ser submetido a limites de corte em função do mecanismo de variação do volume de calda, que depende da variação na pressão do sistema e compensa variações de velocidade. Esse limite foi definido em no máximo 30% de acréscimo ou redução em relação a dose média, o que para uma aplicação com volume de calda de 60 L ha⁻¹ possibilita valores mínimos de 42 L ha⁻¹ e valores máximos de 78 L ha⁻¹. Além disso, o operador foi orientado a andar em velocidade normal nas doses abaixo da dose média, e a reduzir a velocidade nas áreas com doses acima da média, de forma a manter o espectro de gotas da pulverização o mais uniforme possível. As aplicações foram realizadas utilizando um pulverizador autopropelido (Figura 14), modelo 4630 (John Deere, Moline, IL, EUA), equipado com pontas de pulverização anti-deriva, jato plano com pré-orifício modelo DG 8003 VS (Spraying Systems Co., Wheaton, IL, EUA).

Figura 14. Aplicação de regulador de crescimento no algodoeiro em taxa variável com pulverizador autopropelido JD 4630.

Os experimentos de avaliação do potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura foram conduzidos na safra 2014/2015, no talhão TC5, utilizando-se a cultivar de algodão TMG 81 WS, que apresenta alta exigência de regulador de crescimento. O protocolo adotado foi o mesmo já descrito para o experimento de avaliação dos algoritmos de aplicação do N em taxa variável, utilizando-se dois tratamentos: o T1 equivale ao controle ou prática mais adotada atualmente, e consistiu da aplicação de uma taxa fixa de regulador de crescimento em toda a área; o T2 consistiu da aplicação de regulador de crescimento em taxa variável de acordo com a metodologia descrita acima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Desempenho dos sensores

A análise de variância dos dados obtidos pelo sensor CropSpec na safra 2012/2013 revelou efeito significativo da interação entre índice de vegetação, estágio da cultura e os dois sistemas de espaçamento na predição da altura das plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado (Tabela 6). Devido à presença da interação, esses dois fatores foram incluídos no modelo de predição, o que na prática significa que é necessário que sejam fornecidas essas informações em complemento ao índice gerado pelo sensor para que este seja mais eficiente.

Tabela 6. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel CropSpec e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2012/2013, Chapadão do Céu – GO.

Fator*	Altura	Massa Fresca	Massa Seca	N Acumulado
IV	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sistema	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
DAE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
IV X Sistema	0,04	<0,01	<0,01	<0,01
IV X DAE	0,03	0,28	0,44	0,32
Sistema X DAE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
IV X Sistema X DAE	0,78	0,13	0,04	0,18

*IV: Índice de vegetação; DAE: estágio da cultura em dias após a emergência.

Os resultados da análise de regressão revelaram desempenho satisfatório do sensor em estimar os parâmetros altura de plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado pela cultura (Figura 15). Os valores do coeficiente de determinação da regressão (R^2) variaram de 0,91 a 0,95, indicando que mais de 90% da variabilidade dos parâmetros avaliados pode ser estimada pelo índice de vegetação obtido pelo sensor. Resultados semelhantes foram observados por BRAGAGNOLO et al. (2013) trabalhando com o sensor N-Sensor (Yara, Duermen, Alemanha) na cultura do milho no Rio Grande do Sul, que obtiveram coeficiente de determinação de 0,91 para a massa seca e de 0,87 para o N acumulado entre os estádios de desenvolvimento V4 a V12.

O RMSE da altura de plantas foi inferior a 0,10 m, o que permite que a altura de plantas estimada pelo sensor possa ser utilizada como informação auxiliar em práticas de manejo da cultura como a aplicação de reguladores de crescimento. O valor do RMSE do N acumulado foi inferior a 20 kg ha⁻¹, o que serve como indicador do nível de precisão com que o sensor pode ser utilizado nessas condições para diferenciar o estado nutricional das plantas quanto ao acúmulo de N.

Apesar do efeito significativo da interação com os espaçamentos entre as fileiras das plantas, observa-se que a qualidade da predição foi semelhante tanto para o sistema de espaçamento convencional quanto para o sistema de cultivo em espaçamento adensado, permitindo que os sensores sejam utilizados nos dois sistemas de cultivo.

Figura 15. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor CropSpec para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2012/2013 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Ao considerar-se os erros de predição em cada fase da cultura, observa-se que nos estádios iniciais da cultura o erro é menor (Tabela 7). Considerando-se apenas as amostragens realizadas até os 50 DAE, período em que normalmente ocorrem as aplicações do N em cobertura, a maioria dos valores de RMSE foi inferior a 10 kg ha^{-1} de N acumulado. Observa-se também que o desempenho dos sensores se tornou menos satisfatório conforme realizou-se as leituras em estádios mais avançados de desenvolvimento das plantas, com menores valores de R^2 e maiores valores de RMSE. Esse comportamento também tem sido observado em outras culturas, e por vezes é atribuído a existência de altos valores de biomassa em toda a área, o que causaria um efeito de saturação dos sensores, com pequenas amplitudes nas variações, explicando as baixas correlações entre o índice de vegetação e a biomassa da cultura (PORTZ et al., 2012; BRAGAGNOLO et al., 2013).

Tabela 7. Desempenho do sensor CropSpec em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2012/2013 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Característica	Variável*	Adensado			Convencional		
		35 DAE	50 DAE	85 DAE	35 DAE	50 DAE	85 DAE
Altura	R ²	0,90	0,70	0,69	0,89	0,91	0,63
	RMSE	0,02	0,11	0,11	0,03	0,04	0,12
Massa Fresca	R ²	0,92	0,66	0,70	0,91	0,86	0,68
	RMSE	482	3535	3870	522	1235	3320
Massa Seca	R ²	0,89	0,65	0,66	0,93	0,86	0,57
	RMSE	91	702	1099	96	330	876
N acumulado	R ²	0,87	0,66	0,66	0,93	0,85	0,54
	RMSE	4,4	22,6	26,5	3,3	10,0	26,8

RMSE: raiz quadrado do erro médio ao quadrado.

A análise de variância dos dados obtidos pelo sensor Crop Circle na safra 2013/2014 também revelou efeito significativo da interação entre índice de vegetação, estágio da cultura e os dois sistemas de espaçamento na predição da altura das plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado pela cultura (Tabela 8). A principal diferença em relação aos resultados apresentados na Tabela 6 está na presença de interações mais fortes com o estágio da cultura, o que está relacionado com as mudanças no padrão de variabilidade da cultura observadas ao longo do ciclo de cultivo.

Tabela 8. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel Crop Circle e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2012/2013, Chapadão do Céu – GO.

Fator*	Altura	Massa Fresca	Massa Seca	N Acumulado
IV	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sistema	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
DAE	0,55	0,07	0,28	0,18
IV X Sistema	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
IV X DAE	0,02	<0,01	<0,01	<0,01
Sistema X DAE	<0,01	0,05	<0,01	0,04
IV X Sistema X DAE	0,91	0,57	0,02	0,50

*IV: Índice de vegetação; DAE: estágio da cultura em dias após a emergência.

Os resultados da análise de regressão foram semelhantes aos observados para o sensor CropSpec na safra anterior, revelando desempenho satisfatório do sensor Crop Circle em estimar os parâmetros altura de plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado pela cultura (Figura 16). Os valores do coeficiente de determinação da regressão (R²) variaram de 0,88 a 0,93, indicando que cerca de 90% da variabilidade dos parâmetros avaliados pode ser estimada pelo índice de vegetação obtido pelo sensor.

O RMSE da altura de plantas também foi inferior a 0,10 m, o que permite que a altura de plantas estimada pelo sensor possa ser utilizada como informação auxiliar em práticas de manejo da cultura como a aplicação de reguladores de crescimento. O valor do RMSE do N acumulado foi de 21 kg ha⁻¹, indicando que este sensor também pode ser utilizado para diferenciar o estado nutricional das plantas quanto ao acúmulo de N. Observa-se que o ajuste foi insatisfatório na última data de amostragem, principalmente no sistema de cultivo adensado, no qual a amplitude dos dados é pequena, evidenciado o problema de saturação relatado anteriormente.

Figura 16. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor Crop Circle para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

A análise de variância dos dados obtidos pelo sensor CropSpec na safra 2013/2014 revelou novamente a presença efeito significativo da interação entre índice de vegetação, estágio da cultura e os dois sistemas de espaçamento na predição da altura das plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado (Tabela 9). As interações presentes são mais semelhantes às observadas nos dados do sensor Crop Circle na mesma safra do que daquelas observadas na safra anterior para o mesmo sensor, indicando que essas diferenças se referem às influências das condições do ano e das áreas cultivadas e não ao efeito de diferenças nos sensores.

Os resultados da análise de regressão com os dados do sensor CropSpec na safra 2013/2014 foram semelhantes aos observados para o mesmo sensor na safra anterior e também aos observados para o sensor Crop Circle na mesma safra, revelando desempenho satisfatório de sensor em estimar os parâmetros altura de plantas, massa fresca, massa seca e N acumulado pela cultura (Figura 17). Os valores do coeficiente de determinação da regressão (R^2) variaram de 0,92 a 0,95, indicando que mais de 90% da variabilidade dos parâmetros avaliados pode ser estimada pelo índice de vegetação obtido pelo sensor. Os valores de coeficiente de determinação obtidos nas condições descritas para o algodão são superiores aos resultados observados por PORTZ et al. (2012) trabalhando

com o sensor N-Sensor™ na cultura da cana-de-açúcar em São Paulo, que obtiveram coeficiente de determinação de 0,83 para a biomassa e de 0,84 para o N acumulado para plantas entre 0,2 e 0,6 m de altura de colmo.

Tabela 9. Resumo da análise de variância da relação entre o índice de vegetação do sensor ativo de dossel CropSpec e parâmetros do algodoeiro cultivado na safra 2013/2014, Chapadão do Céu – GO.

Fator*	Altura	Massa Fresca	Massa Seca	N Acumulado
IV	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sistema	<0,01	0,07	0,54	0,41
DAE	0,34	<0,01	0,17	<0,01
IV X Sistema	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
IV X DAE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sistema X DAE	0,05	0,25	0,18	0,38
IV X Sistema X DAE	0,08	<0,01	0,98	0,12

*IV: Índice de vegetação; DAE: estágio da cultura em dias após a emergência.

Figura 17. Relação entre valores observados e os preditos pelo sensor CropSpec para a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

O RMSE da altura de plantas foi de 0,05 m, indicando desempenho superior aos observado nos outros resultados, o que permite que a altura de plantas estimada pelo sensor possa ser utilizada como informação auxiliar em práticas de manejo da cultura como a aplicação de reguladores de crescimento. O valor do RMSE do N acumulado novamente foi inferior a 20 kg ha⁻¹, confirmando o nível de precisão com que o sensor pode ser utilizado nessas condições para diferenciar o estado nutricional das plantas quanto ao acúmulo de N.

Ao analisarmos o desempenho dos sensores em estimar a quantidade de N acumulado pela biomassa da parte aérea das plantas de algodão observa-se que os valores de R² são reduzidos, em função da menor amplitude dos dados, entretanto os valores de erro da estimativa também são menores (Tabela 10). Considerando-se apenas as amostragens realizadas até os 51 DAE, período em que normalmente ocorrem as aplicações do N em cobertura, a maioria dos valores de RMSE foi inferior a 10 kg ha⁻¹ de N acumulado, com exceção do erro de estimativa do sensor Crop Circle que foi de 17 kg ha⁻¹ aos 51 DAE. Esse erro está relacionado à variabilidade presente em pequenas distâncias, de uma fileira para outra de plantas, que causa maior influência no sensor Crop Circle em função da área efetivamente amostrada por este sensor ser pequena quando comparada a área amostrada pelo sensor CropSpec.

Tabela 10. Desempenho do sensor CropSpec em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Característica	Variável*	Adensado			Convencional		
		38 DAE	51 DAE	72 DAE	33 DAE	51 DAE	85 DAE
Altura	R ²	0,71	0,56	0,61	0,62	0,91	0,95
	RMSE	0,03	0,05	0,07	0,05	0,04	0,07
Massa	R ²	0,80	0,56	0,46	0,69	0,93	0,96
Fresca	RMSE	634	1628	3664	708	1084	3137
Massa	R ²	0,81	0,44	0,48	0,63	0,92	0,96
Seca	RMSE	110	286	566	119	241	556
N acumulado	R ²	0,83	0,45	0,52	0,49	0,94	0,92
	RMSE	3,4	10,6	23,9	4,7	9,2	29,4

RMSE: raiz quadrado do erro médio ao quadrado.

O fato dos valores de R² terem ficado menores com o desenvolvimento da cultura no sistema adensado, mas terem aumentado no cultivo com espaçamento convencional, se deve as características das áreas e à amplitude da variabilidade presente em cada uma delas. A área de algodão adensado em geral apresentou baixa variabilidade, entretanto o efeito da distribuição irregular dos resíduos culturais da soja e da qualidade da semeadura proporcionaram um nível maior de variabilidade inicial, que tendeu a diminuir com o desenvolvimento da cultura (Figura 18). Observa-se também que nesta área as manchas com os maiores e menores valores do índice de vegetação ocorreram em partes diferentes do talhão para cada data considerada, o que não caracteriza a existência de estabilidade temporal da variabilidade espacial.

Figura 18. Mapas do índice de vegetação do sensor CropSpec (IVCS) observados aos 51 e 72 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Já a área onde foram realizadas as amostragens no algodão com espaçamento convencional apresentava variações em atributos do solo como capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica e textura, que proporcionou o aumento da variabilidade com o desenvolvimento da cultura, o que refletiu no melhor desempenho dos sensores (Figura 19). Embora também seja possível observar a presença de variabilidade em curtas distâncias, nessa área destacam-se grande manchas com valores menores do índice de vegetação, que se mantêm em lugares semelhantes com o passar do tempo, o que caracteriza a existência de estabilidade temporal da variabilidade espacial.

Figura 19. Mapas do índice de vegetação do sensor CropSpec (IVCS) observados aos 51 e 85 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Considerando-se o desempenho do sensor Crop Circle em cada fase da cultura (Tabela 11), observa-se que os resultados no talhão cultivado com algodão adensado foram inferiores do que no talhão cultivado com algodão em espaçamento convencional, vale lembrar que o espaçamento entre fileiras em si não é o responsável por essa diferença de desempenho, mas sim o fato dos níveis de variabilidade das áreas serem distintos.

Tabela 11. Desempenho do sensor CropCircle em estimar a altura de plantas, massa fresca, massa seca e o N acumulado por algodoeiro cultivado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Característica	Variável*	Adensado			Convencional		
		38 DAE	51 DAE	72 DAE	33 DAE	51 DAE	85 DAE
Altura	R ²	0,41	0,62	0,20	0,78	0,72	0,90
	RMSE	0,03	0,04	0,08	0,02	0,08	0,10
Massa Fresca	R ²	0,61	0,73	0,14	0,76	0,77	0,93
	RMSE	803	1271	3997	455	2505	4064
Massa Seca	R ²	0,61	0,73	-0,09	0,77	0,76	0,92
	RMSE	147	207	640	59	457	792
N acumulado	R ²	0,62	0,70	0,12	0,82	0,77	0,87
	RMSE	4,5	8,3	27,2	1,7	17,8	34,8

RMSE: raiz quadrado do erro médio ao quadrado.

O pior desempenho foi observado na avaliação realizada aos 72 DAE no algodão adensado e está relacionado a escala da variabilidade identificada nessa área. Os resultados desse sensor foram mais afetados pela variabilidade em pequenas distâncias do que aqueles do sensor CropSpec em função do ângulo de visada e principalmente da área amostrada ser menor. Quanto maior a área amostrada pelo sensor, menos os valores são afetados por diferenças que ocorrem entre uma planta e outra ou entre uma fileira de plantas e outra.

Pode-se observar que na presença de grande amplitude dos valores, como na área de algodão convencional, mesmo aos 85 DAE, período em que todo o N de cobertura usualmente já foi aplicado, os sensores seguem com bom desempenho e não demonstram sinais de saturação por excesso de biomassa da cultura, o que permite a utilização dos dados de índice de vegetação fornecidos pelos sensores nas aplicações de reguladores de crescimento, que normalmente se estendem até os 120 DAE.

Nos mapas de NDRE do sensor Crop Circle aos 51 e 72 DAE na área de algodão adensado (Figura 20), fica evidente a presença de variabilidade espacial em curtas distâncias, sendo difícil o reconhecimento de manchas com maior ou menor desenvolvimento vegetativo da cultura. Observa-se também pela escala de valores que a amplitude das variações é pequena, indicando que neste caso a gestão da área pela média poderia ser adequada.

Figura 20. Mapas do índice de vegetação por diferença normalizada pelo “red-edge” (NDRE) do sensor Crop Circle observados aos 51 e 72 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

De forma semelhante ao observado nos mapas dos índices de vegetação do sensor CropSpec, na área onde foram realizadas as amostragens no algodão com espaçamento convencional, é possível observar-se pelos mapas de NDRE do sensor Crop Circle (Figura 21), que além da presença de variabilidade em curtas distâncias, mais evidente aos 51 DAE, destacam-se grande manchas com valores menores do índice de vegetação, que ocorrem nos mesmos lugares nas datas consideradas.

Figura 21. Mapas do índice de vegetação por diferença normalizada pelo “red-edge” (NDRE) do sensor Crop Circle observados aos 51 e 85 dias após a emergência (DAE) no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

4.2. Resposta ao N aplicado em cobertura

A análise de variância do experimento com algodão convencional no talhão TC3 (Tabela 12) revelou que o efeito da interação entre potencial produtivo e a dose de nitrogênio foi significativa apenas para as variáveis altura e massa fresca, relacionadas ao crescimento vegetativo das plantas. Isso significa que para as demais variáveis o efeito do fator dose de nitrogênio não dependeu do potencial produtivo e, portanto, a dose ideal de nitrogênio foi a mesma para todas as situações, bastando analisar o efeito isolado das doses.

Tabela 12. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.

Fator*	G. L.	Massa Fresca	Altura	N Acumulado	Produtividade
Bloco	2	0,96	0,58	0,45	0,81
UGD	2	0,95	0,17	0,25	0,28
CV (Parcela)	4	25,2%	10,5%	16,3%	14,0%
Dose	4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
UGD X Dose	8	<0,01	0,02	0,23	0,28
CV (Subparcela)	24	6,7%	5,9%	18,6%	7,3%

*Doses de N: 0, 40, 80, 120 e 160 kg N ha⁻¹. UGD: unidades de gerenciamento diferenciado.

O efeito da dose de N foi significativo para todas as variáveis analisadas, evidenciando que o algodoeiro responde à adubação nitrogenada. Ao analisar-se o fator UGD, observa-se que este não apresentou efeito significativo em nenhuma das variáveis, o que indica que as variações encontradas na área e que foram usadas para definir os níveis desse fator foram insuficientes para causar diferenças significativas, ou seja, a variabilidade espacial do potencial produtivo de algodoeiro dentro da área usada para este experimento poderia ser desconsiderada. A

partir da observação do efeito significativo das doses de N na produtividade do algodoeiro, realizou-se a análise de regressão linear para se estabelecer a curva de dose-resposta da cultura (Figura 22).

Para determinar-se a dose de máximo retorno econômico, adotou-se como base o valor de R\$ 67,50 por arroba de pluma de algodão (15 kg) e considerou-se o rendimento médio de 40% de pluma para o algodão em caroço, obtendo-se os valores de R\$ 1,80 por kg de algodão em caroço e de R\$ 2,70 por kg de N. A dose ideal de N aplicado em cobertura para o algodão convencional, nas condições descritas nesse experimento, foi de 115 kg ha⁻¹, possibilitando uma produtividade de 5200 kg ha⁻¹ de algodão em caroço. Esse valor é superior aos 90 kg ha⁻¹ adotado pelo produtor na mesma área e safra do experimento, que segundo a equação de regressão, resultaria numa produtividade de 5130 kg ha⁻¹. Os valores observados estão dentro do intervalo recomendado pelos órgãos oficiais de pesquisa para o cultivo de algodoeiro no Cerrado, que varia de 80 a 120 kg ha⁻¹, dependendo da produtividade esperada e do potencial de resposta do solo (CARVALHO, et al., 2007).

Figura 22. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura média, em Chapadão do Céu – GO.

É importante observar-se que o custo do fertilizante nitrogenado na cultura do algodão é relativamente pequeno, representando cerca de 7% dos custos de produção nessa situação. Isso demonstra que o potencial de aplicação em taxas variáveis de nitrogênio para melhor atender as demandas da cultura está mais relacionado aos ganhos de produtividade do que à redução do custo de produção, embora esse também seja importante.

Na análise de variância do experimento com algodão adensado (Tabela 13), observa-se que o efeito das doses de nitrogênio foi altamente significativo para todas as variáveis analisadas, incluindo a quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas. A análise de regressão linear revelou uma curva de dose-resposta para o algodoeiro adensado diferente daquela para o convencional (Figura 23), embora o sistema de cultivo não seja a única diferença entre os dois experimentos, uma vez que as condições edafoclimáticas foram diferentes. O máximo retorno econômico nas condições descritas para o experimento foi obtido com a dose de N aplicado em cobertura de 131 kg ha⁻¹, que resultaria na produtividade de 4140 kg ha⁻¹ de algodão em caroço.

Tabela 13. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Chapadão do Céu – GO.

Fator*	G. L.	Massa Fresca	Altura	N Acumulado	Produtividade
Dose	4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Linha	4	0,39	0,24	0,22	0,15
Coluna	4	0,65	0,20	0,37	0,24
CV	12	9,0%	5,9%	13,1%	7,6%

*Doses de N: 0, 40, 80, 120 e 160 kg N ha⁻¹.

Figura 23. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Chapadão do Céu – GO.

Na análise de variância do experimento com algodão cultivado em espaçamento convencional do talhão TC4 (Tabela 14), observa-se que o efeito das doses de nitrogênio não foi significativo para nenhuma das variáveis analisadas, existindo efeito significativo apenas para o fator UGD.

Tabela 14. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Campo Verde - MT.

Fator*	G. L.	Massa Fresca	Altura	N Acumulado	Produtividade
Dose	5	0,09	0,40	0,50	0,86
UGD	2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Bloco	2	0,64	0,01	0,77	0,52
Dose X UGD	10	0,68	0,90	0,59	0,72
CV	34	16,7%	10,7%	22,3%	13,8%

*Doses de N: 0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg N ha⁻¹. UGD: unidades de gestão diferenciadas.

O solo nessa área é predominantemente argiloso, com valores adequados de CTC (7 cmol_c dm³) e matéria orgânica (30 g kg⁻¹), o que associado ao maior período do solo com teor adequado de umidade disponível deve ter favorecido os processos de mineralização do N presente no solo, sendo capaz de suprir toda a demanda das plantas. Além disso, neste talhão ocorreram alguns problemas que podem ter influenciado neste resultado, como a ocorrência

da doença azul, uma virose que aparece em reboleiras e pode causar até 100% de redução de produtividade, e a alta infestação de bicudo. Neste caso não foi possível calcular-se a equação de dose-resposta, pois estatisticamente qualquer dose de N apresentou a mesma produtividade e, portanto, não seria recomendado aplicar N em cobertura nessas condições (Figura 24).

Figura 24. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, em Campo Verde - MT.

Uma característica climática marcante deste ano safra foi a ocorrência de chuvas frequentes e longos períodos com dias nublados nos meses de abril e maio, período de desenvolvimento das estruturas reprodutivas do algodoeiro. Essa condição climática favoreceu o desenvolvimento de patógenos que causam o abortamento de estruturas reprodutivas e apodrecimento das maçãs, principalmente do terço inferior da planta, onde o microclima é mais favorável a esta ocorrência. Nessas condições as plantas com melhor desenvolvimento acabam sofrendo maiores perdas, de modo que é importante salientar que qualquer conclusão obtida nesse cenário não deve ser extrapolada para outras condições.

Na análise de variância do experimento com algodão cultivado em espaçamento convencional do talhão TC5 (Tabela 15), observa-se que tanto o efeito das doses de N quanto do fator UGD foram significativos para todas as variáveis analisadas, existindo ainda o efeito significativo para a produtividade na interação entre doses de N e UGD.

Tabela 15. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura e do efeito do potencial produtivo em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Fator*	G. L.	Massa Fresca	Altura	N Acumulado	Produtividade
Dose	5	<0,01	<0,01	0,07	0,03
UGD	2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Bloco	2	0,03	0,71	0,54	0,48
Dose X UGD	10	0,71	0,81	0,55	0,06
CV	34	25,5%	13,0%	33,1%	23,5%

*Doses de N: 0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg N ha⁻¹. UGD: unidades de gestão diferenciadas definidas pela condutividade elétrica aparente do solo na camada de 0 – 0,3 m.

Ao realizar-se o desdobramento da interação significativa observada para a produtividade, observa-se que a dose de N aplicado em cobertura proporcionou diferenças significativas apenas na UGD de médio potencial produtivo (Tabela 16). O fato de não existir resposta ao N na UGD de maior potencial corrobora com os resultados observados no talhão TC4 e com as condições climáticas observadas, pois nessa parte do talhão o solo foi capaz de suprir as necessidades de N da planta.

Tabela 16. Resumo da análise de variância da resposta em produtividade ao N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Fator*	G. L.	Baixa	Média	Alta
Dose	5	0,28	0,04	0,33
Bloco	1	0,59	0,63	0,44
Resíduos	11	35,8%	17,3%	21,8%

*Doses de N: 0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg N ha⁻¹.

A falta de resposta ao N na UGD de baixo potencial deve ser interpretada com cuidado pois nessa situação é provável que outros fatores limitem mais a produtividade que o N, fazendo com que o aumento da dose de N não resulte em incrementos de produtividade significativos. Entretanto existe aumento na produção de biomassa pelas plantas, o que é desejável nessas condições para melhorar a capacidade das plantas de algodão de exercer o controle cultural das plantas daninhas, pois do contrário as plantas daninhas poderão tornar-se contaminantes do algodão no momento da colheita e prejudicar a qualidade de fibra de todo o talhão.

A análise de regressão para a UGD de médio potencial revelou uma resposta linear da produtividade em função das doses de N aplicadas em cobertura (Figura 25). Nesse cenário o máximo retorno econômico nas condições descritas para o experimento foi obtido com a dose máxima de N aplicado em cobertura (250 kg ha⁻¹), que resultaria na produtividade de 4460 kg ha⁻¹ de algodão em caroço.

Figura 25. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Na análise de variância do experimento com algodão cultivado em espaçamento adensado do talhão TA4 (Tabela 17), observa-se que tanto o efeito das doses de N quanto do fator UGD foram significativos para todas as variáveis analisadas, existindo ainda o efeito significativo da interação entre doses de N e UGD para a produtividade e N acumulado.

Tabela 17. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado em solo de textura arenosa, em Campo Verde – MT.

Fator*	G. L.	Massa Fresca	Altura	N Acumulado	Produtividade
Dose	5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
UGD	2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Bloco	2	0,06	0,05	0,08	0,06
Dose X UGD	10	0,27	0,37	0,08	0,04
CV	34	16,0%	13,4%	31,1%	19,7%

*Doses de N: 0, 56, 112, 168, 224 e 280 kg N ha⁻¹. UGD: unidades de gestão diferenciadas definidas pela condutividade elétrica aparente do solo na camada de 0 – 0,30 m.

Ao realizar-se o desdobramento da interação significativa observada para a produtividade, verifica-se que a dose de N aplicado em cobertura proporcionou diferenças significativas apenas nas UGD de baixo e médio potencial produtivo (Tabela 18). O fato de não existir resposta ao N na UGD de maior potencial corrobora com os resultados observados nos talhões TC4 e TC5 e com as condições climáticas observadas. Entretanto observa-se que existe resposta até a dose de 112 kg ha⁻¹ (Figura 26), mas esta é muito variável entre as repetições, o que compromete a significância estatística.

Tabela 18. Resumo da análise de variância da resposta ao N aplicado em cobertura em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado em solo de textura arenosa, em Campo Verde – MT.

Fator*	G. L.	Baixa	Média	Alta
Dose	5	<0,01	<0,01	0,07
Bloco	1	<0,01	<0,01	0,15
CV	11	19,1%	7,4%	14,1%

*Doses de N: 0, 56, 112, 168, 224 e 280 kg N ha⁻¹.

A análise de regressão para a UGD de baixo potencial revelou uma resposta linear da produtividade em função das doses de N aplicadas em cobertura (Figura 26). Nesse cenário o máximo retorno econômico nas condições descritas para o experimento foi obtido com a dose máxima de N aplicado em cobertura (280 kg ha⁻¹), que resultaria na produtividade de 1720 kg ha⁻¹ de algodão em caroço, o que é uma produtividade muito baixa, insuficiente para cobrir os custos de produção.

Figura 26. Produtividade de algodão em caroço em função do N aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Na UGD de médio potencial a resposta da produtividade em função das doses de N aplicadas em cobertura foi ajustada a um modelo quadrático. Nesse cenário o máximo retorno econômico foi obtido com a dose de N aplicado em cobertura de 180 kg ha^{-1} , que resultaria na produtividade de 4880 kg ha^{-1} de algodão em caroço.

Os resultados evidenciados pela análise de variância puderam ser constatados no campo (Figura 27). As duas imagens foram tomadas no mesmo dia, quando a cultura estava com 150 DAE. Observa-se que na UGD de baixo potencial produtivo as plantas apresentam desenvolvimento muito reduzido (0,3 m de altura), com antecipação da maturação e baixa produtividade, além da presença de plantas daninhas. Por outro lado, na UGD de maior potencial produtivo as plantas estão bem desenvolvidas (1,2 m de altura), com dossel fechado e folhas saudáveis, livres da presença de plantas daninhas e em estágio ainda de início da abertura de capulhos.

Figura 27. Algodoeiro cultivado em espaçamento adensado aos 150 dias após a emergência em área de baixo (esquerda) e alto (direita) potencial produtivo no mesmo talhão na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Em trabalho semelhante, realizado por GIMENEZ e CORTINOVE (2015), a diferença de produtividade na UGD de alto potencial produtivo, entre a testemunha sem adubação de cobertura e com a adubação de cobertura na dose recomendada, foi de 375 kg ha^{-1} de algodão em caroço, o que não foi estatisticamente diferente. A produtividade também não diferiu ao usar-se a dose recomendada ou o dobro desta. Já na UGD de baixo potencial produtivo, todos os tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas. A diferença entre a testemunha e a adubação com a dose recomendada foi de 2970 kg ha^{-1} de algodão em caroço, um acréscimo de cerca de 200% em relação a testemunha. Ao utilizar-se o dobro da dose da adubação de cobertura, houve ainda um incremento de 1080 kg ha^{-1} de algodão em caroço, atingindo-se produtividades semelhantes às obtidas na UGD de alto potencial produtivo.

De maneira geral, comparando-se os resultados obtidos nos cinco experimentos e os trabalhos de outros autores, com as devidas ponderações, principalmente com relação as condições climáticas, observa-se que os resultados seguem a mesma tendência, com respostas maiores ao N aplicado em cobertura nas UGD de baixo potencial produtivo, que apresentam solos com menor condutividade elétrica aparente, relacionada ao menor teor de argila, menor CTC e menor teor de matéria orgânica do solo. Nessas condições a capacidade do solo em suprir a demanda de N da planta é limitada, o que faz com que as plantas apresentem maiores respostas e também respondam a doses maiores de N.

4.3. Definição dos algoritmos para a aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em tempo real baseadas nas leituras dos sensores

A partir da metodologia descrita anteriormente e das duas teorias para a melhor estratégia de redistribuição do N aplicado no algodoeiro, foram criados os dois algoritmos que serviram de base para todas as aplicações. Como exemplo, será utilizado um algoritmo que teve como objetivo aplicar uma taxa média de 45 kg ha⁻¹ de N, realizada quando a cultura já tinha acumulado em média 30 kg ha⁻¹ de N. Adotou-se um fator de eficiência de 1,5, significando que para a fonte de N e condições climáticas da aplicação, espera-se que a cada 1,5 kg de N aplicado sejam convertidos em 1 kg de N acumulado na biomassa aérea da cultura (eq. 4). Os limites de doses foram fixados em 60% acima ou abaixo da dose média, permitindo variações entre 18 e 72 kg ha⁻¹. O limite de corte para suspender a aplicação respeitou o valor de 20% do acúmulo média de N pela cultura, ou seja, 6 kg ha⁻¹ (eq. 5). Utilizando esses parâmetros obtêm-se as equações abaixo:

$$Rx = 45 + (N_{Acc_{Atual}} - 30) * Inc * 1,5 \quad (4)$$

$$Tx_{Mínima} = 18; Tx_{Máxima} = 72; Corte = 6; \quad (5)$$

Utilizando-se o valor negativo para a inclinação nessa equação obtêm-se o gráfico que está apresentado na Figura 28. Observa-se que a dose aplicada é zero sempre que o valor de N acumulado é inferior a 6 kg ha⁻¹, que são os locais da lavoura onde não existe cultura instalada ou existe algum outro problema que torne a chance de resposta muito pequena. Na faixa em que o acúmulo de N pela cultura ficou entre 6 e 12 kg ha⁻¹, a taxa aplicada é igual ao máximo permitido, 72 kg ha⁻¹. A partir desse ponto a taxa decresce na razão de 1,5 kg de N aplicado para cada aumento 1,0 kg de N acumulado na cultura. A taxa média de 45 kg ha⁻¹ coincide com o ponto do acúmulo médio de N pela cultura, evidenciando que caso a lavoura fosse uniforme e o valor de acúmulo de N fosse o mesmo em todo o talhão, o algoritmo recomendaria uma taxa fixa de 45 kg ha⁻¹ de N em toda a área. A taxa recomendada atinge seu valor mínimo, de 18 kg ha⁻¹ quando o valor estimado de N acumulado pela cultura chega em 48 kg ha⁻¹. Todos os locais do talhão com plantas mais vigorosas que as desse ponto receberão a mesma dose, em função das limitações da possibilidade de variação da taxa pela máquina e também por uma questão de segurança, pois é possível que a cultura apresente resposta a uma dose menor de N mesmo quando o fornecimento pelo solo está em níveis adequados ou suficientes.

Utilizando-se o valor positivo para a inclinação nessa equação obtêm-se o gráfico que está apresentado na Figura 29. O mesmo critério de corte é aplicado, pois é consenso que nas áreas sem plantas não existe resposta ao N aplicado. Na faixa em que o acúmulo de N pela cultura ficou entre 6 e 12 kg ha⁻¹, a taxa aplicada é igual ao valor mínimo de 18 kg ha⁻¹, considerando que as plantas nessas condições apresentam potencial produtivo muito baixo e resposta limitada ao N aplicado. A partir desse ponto a taxa cresce na razão de 1,5 kg de N aplicado para cada aumento 1,0 kg de N acumulado na cultura. A taxa média de 45 kg ha⁻¹ também coincide com o ponto do acúmulo médio de N pela cultura. A taxa recomendada atinge seu valor máximo, de 72 kg ha⁻¹ quando o valor estimado de N acumulado pela cultura chega em 48 kg ha⁻¹. Todos os locais do talhão com plantas mais vigorosas que as desse ponto receberão a mesma dose, em função das limitações da possibilidade de variação da taxa pela máquina e também porque existe um ponto a partir do qual o N deixa de ser o limitante à altas produtividades e aumentos da dose não seriam revertidos em aumento de potencial produtivo.

Figura 28. Algoritmo com inclinação negativa para aplicação de nitrogênio em taxa variável.

Figura 29. Algoritmo com inclinação positiva para aplicação de nitrogênio em taxa variável.

Os parâmetros da equação foram modificados conforme a necessidade para cada aplicação, mas de maneira geral os algoritmos utilizados nas duas safras de realização dos experimentos em faixas são variações dos dois algoritmos apresentados (Figura 28 e Figura 29). As diferenças que podem ser observadas no coeficiente de variação (CV) das doses aplicadas (Tabela 19), se devem principalmente as características da área e da cultura no momento de cada aplicação. Os dados utilizados no cálculo do coeficiente de variação foram obtidos nos mapas de pós-aplicação da máquina, e consideram apenas as variações no sentido longitudinal da aplicação. As variações de doses nas áreas aplicadas em taxa fixa, referem-se principalmente ao tempo para o controlador ajustar a taxa em função de alterações na velocidade do deslocamento, assim, áreas mais irregulares e com presença de terraços apresentam maiores valores de CV.

No talhão TC2 as variações de dose na primeira aplicação em taxa variável foram pequenas, ficando muito semelhantes a variação observada na aplicação em taxa fixa. Na segunda aplicação em taxa variável os valores de CV foram maiores, na faixa de 15 a 25%, indicando que o sensor estimou maior variabilidade na lavoura em relação a aplicação anterior. O menor CV na área de aplicação em taxa fixa provavelmente está relacionado a manutenção de velocidade mais constante durante a aplicação.

Tabela 19. Coeficiente de variação da dose de N aplicada em cobertura de acordo com os algoritmos utilizados para aplicação em taxa variável.

Talhão	DAE	Dose Média (kg ha ⁻¹)	Tratamento			
			Fix-Fix	Neg-Neg	Neg-Pos	Pos-Pos
TC2	40	30	5,9%	5,2%	4,9%	6,2%
	60	30	1,1%	16,6%	26,7%	14,4%
TA2	40	35	0,4%	8,2%	8,3%	5,9%
	53	35	0,5%	6,9%	6,9%	7,7%
TC4	50	45	2,3%	1,6%	7,2%	1,7%
	58	45	7,8%	56,4%	44,0%	47,9%
TA4	36	31	9,6%	60,5%	52,3%	33,1%
	48	45	8,4%	38,8%	29,8%	82,2%
	60	45	11,8%	43,1%	74,1%	95,5%

O talhão TA2 apresentou valores de CV abaixo de 1% nas duas aplicações, o que está condizente com as características da área, que é plana e uniforme. As variações nas aplicações em taxa variável foram menores que 10% e se devem a uniformidade do desenvolvimento das plantas na área. Nessas condições, a maior parte da área recebeu doses de N semelhantes à dose média, evidenciando que em condições de baixa variabilidade o algoritmo gera recomendações que são semelhantes a aplicação em taxa fixa.

A primeira aplicação no talhão TC4 apresentou valores de CV baixos em todos os tratamentos, de modo que na média a variação utilizando os algoritmos e a variação na taxa fixa foram semelhantes. No momento da aplicação nessa área as plantas estavam menores que nas demais, apesar de serem mais velhas, em função de danos causados pela fitotoxicidade de herbicidas aplicados para eliminar plantas daninhas e plantas voluntárias de soja. Assim, as plantas em toda a área estavam subdesenvolvidas e com valores de N acumulados baixos, fazendo com que a variação nas doses também fosse baixa.

Na segunda aplicação, apesar de terem se passado apenas 8 dias, as plantas haviam crescido expressivamente, graças às condições climáticas favoráveis e ao estímulo do N aplicado, o que elevou os valores de CV das aplicações em taxa variável para cerca de 50%. As principais causas das diferenças no desenvolvimento das plantas nessa fase foram as variações de textura presentes na área e a ocorrência de uma doença causada por vírus, conhecida como doença azul, que causa redução drástica no desenvolvimento das plantas e esterilidade da planta. Essa doença apresenta dispersão restrita e ocorrência em reboleiras de acordo com a movimentação de seu vetor, o pulgão do algodoeiro. Nas reboleiras de maior extensão e que a infecção ocorreu em plantas muito jovens, o acúmulo de N pelas plantas é muito pequeno, ficando abaixo do limite inferior de 20% da média do talhão, fazendo com que a aplicação de N seja interrompida nesses locais.

O talhão TA4 apresentou em geral os maiores valores de CV, tanto das aplicações em taxa fixa quanto das aplicações em taxa variável utilizando-se os algoritmos propostos. Os valores de CV próximos a 10% na aplicação em taxa fixa são devido a aplicação em linha reta, atravessando os terraços presentes na área, o que leva a mudanças

de velocidade frequentes. Os valores de CV nas aplicações em taxa variável chegaram a 95%, numa condição de acúmulo de N bastante elevada e de variabilidade no talhão muito expressiva (Figura 30), causada principalmente pelas diferenças em atributos do solo como textura, capacidade de troca de cátions e teor de matéria orgânica. Na última aplicação, as doses ficaram concentradas nos valores mínimos e máximos permitidos, indicando que a variação de doses não foi suficiente para acompanhar a variação do desenvolvimento das plantas estimada pelo sensor.

Figura 30. Grande variação no desenvolvimento das plantas observado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

4.4. Validação dos algoritmos para redistribuição das doses de nitrogênio

A primeira etapa da análise estatística dos dados coletados nos experimentos para validação dos algoritmos para redistribuição das doses de N foi a seleção do modelo estatístico. Os dados foram agrupados para formar polígonos quadrados, tomando-se a média das variáveis de interesse, a fim de reduzir o tempo computacional das análises e também reduzir os efeitos da variabilidade presente em curtas distâncias. Todos os modelos levaram em conta os possíveis efeitos da estratégia adotada e da interação com a covariável CE, sendo avaliados quanto a presença de dependência espacial dos resíduos. A matriz de variância-covariância para o modelo com dependência espacial assumiu um modelo exponencial, desconsiderando a existência de efeito pepita. Todos os ajustes foram realizados pelo método da máxima verossimilhança. A escolha do modelo baseou-se no alcance da dependência espacial e nos menores valores do critério de informação de Akaike e do critério de informação Bayesiano.

Em todas as áreas o melhor ajuste foi obtido no modelo que considerou a dependência espacial dos resíduos (Tabela 20), evidenciando que em experimentos dessa dimensão não se deve assumir que os princípios da estatística clássica são sempre satisfeitos. A única exceção foi o talhão TA4, que mesmo apresentando melhor ajuste no modelo com dependência espacial, exibiu um alcance próximo de 0. Isso significa que a dependência espacial dos resíduos nessa área ocorre em escala menor do que a encontrada nos dados e, portanto, pode-se considerar que os resíduos apresentam distribuição independente da posição na área.

Tabela 20. Seleção dos modelos para análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em áreas com diferentes níveis de variabilidade espacial.

Talhão	Modelo ⁽¹⁾	G.L. ⁽²⁾	Alcance	AIC ⁽³⁾	BIC ⁽⁴⁾
TC2	Prod = Trat. X CE 30	10	-	5122	5161
	Prod = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.*	11	868	4722	4765
TA2	Prod = Trat. X CE 30	10	-	8297	8340
	Prod = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.*	11	103	7673	7721
TC4	Prod = Trat. X CE 30*	10	-	2981	3013
	Prod = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.	11	0	2645	2681
TA4	Prod = Trat. X CE 30	10	-	2444	2475
	Prod = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.*	11	408	2342	2376

⁽¹⁾Prod: Produtividade de algodão em caroço; Trat.: Estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado; CE 30: Condutividade elétrica do solo; Cor. Exp.: Matriz de covariância espacial ajustada por modelo exponencial; O asterisco representa o modelo de melhor ajuste. ⁽²⁾G.L.: Graus de liberdade do modelo. ⁽³⁾Critério de informação de Akaike. ⁽⁴⁾Critério de informação Bayesiano.

A análise de variância dos dados do talhão TC2 revelou a existência de efeito do fator tratamento sobre a produtividade (Tabela 21), não existindo efeito significativo para os demais termos do modelo. A não existência do efeito da CE significa que todos os tratamentos estavam em condições semelhantes de solo.

Tabela 21. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Fator	Graus de liberdade	Estat. F	P-valor
Tratamento	3	8,06	<0,01
CE 30	1	0,10	0,74
Tratamento X CE 30	3	1,49	0,22
Resíduos	347		

Ao realizar-se a comparação múltipla entre médias pelo teste de Tukey não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 22), embora a análise de variância tenha indicado efeito significativo. Apesar da amplitude de valores de cerca de 130 kg e que de acordo com os testes realizados todas as médias podem ser consideradas iguais, os dois tratamentos com a utilização do algoritmo com inclinação negativa na primeira aplicação em taxa variável proporcionaram as maiores produtividades.

Tabela 22. Produtividade média de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Tratamento	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Neg-Pos	4.973 A
Neg-Neg	4.925 A
Fix-Fix	4.877 A
Pos-Pos	4.845 A

Valores seguidos da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A pequena diferença entre os tratamentos está relacionada à baixa variabilidade da área, que por consequência gerou pequenas diferenças nas doses de N aplicadas, conforme apresentado na Tabela 19. Em geral as doses totais aplicadas nos tratamentos em taxa variável ficaram entre 70 e 90 kg ha⁻¹ (Figura 31 e Figura 32), o que mostra que a redistribuição proposta pelo algoritmo está coerente com a amplitude da variabilidade presente na área.

Figura 31. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Figura 32. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Esta área pode ser considerada a mais homogênea dentre os talhões utilizados nessa etapa de validação dos algoritmos, que por consequência gerou pequenas diferenças nas doses de N aplicadas, conforme apresentado na Tabela 19. Em geral as doses totais aplicadas nos tratamentos em taxa variável ficaram entre 90 e 110 kg ha⁻¹, com grande concentração de valores próximos ao da dose média (Figura 34 e Figura 35), o que mais uma vez mostra que a redistribuição proposta pelo algoritmo está coerente com a amplitude da variabilidade presente na área.

Figura 34. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

Figura 35. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

A produtividade de algodão em caroço apresentou variações com o mesmo alinhamento da semeadura, em ângulo em relação à realização dos tratamentos fitossanitários (Figura 36), provavelmente causadas por alguma falha operacional no momento da semeadura ou alguma prática realizada em safras anteriores apenas em parte do talhão. O fato do sentido das faixas de valores mais altos ou mais baixos de produtividade não ser o mesmo do sentido das unidades experimentais indica que as diferenças de produtividade foram causadas por fatores que não puderam ser controlados e não pelas diferentes estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado.

Figura 36. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2013/2014 em um Latossolo Vermelho, em Chapadão do Céu – GO.

A análise de variância dos dados do talhão TC4 revelou que apenas a CE exerceu efeito significativo sobre a produtividade de algodão em caroço (Tabela 23). O efeito altamente significativo da CE significa que essa covariável foi importante para o melhor controle experimental nessas condições, pois na falta dessa informação é provável que as diferenças observadas na produtividade fossem equivocadamente atribuídas aos tratamentos.

Tabela 24. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT.

Fator	Graus de liberdade	Estat. F	P-valor
Tratamento	3	0,80	0,49
CE 30	1	206,36	<0,01
Tratamento X CE 30	3	0,18	0,91
Resíduos	180		

Esta área apresenta diferenças texturais e historicamente existem regiões no talhão com produtividades distintas, favorecendo a existência de plantas com estados nutricionais distintos, que por consequência gerou maiores diferenças nas doses de N aplicadas, conforme apresentado na Tabela 19. Em geral as doses totais aplicadas nos tratamentos em taxa variável ficaram entre 100 e 200 kg ha⁻¹ (Figura 34 e Figura 35), o que mais uma vez mostra que a redistribuição proposta pelo algoritmo está coerente com a amplitude da variabilidade presente na área.

Figura 37. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT.

Figura 38. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT.

Neste talhão observa-se que a produtividade de algodão em caroço apresenta variações relacionadas com os valores de CE e independentes do sentido de realização da semeadura e dos tratos fitossanitários (Figura 39). Fica evidente que as diferenças de produtividade são pouco influenciadas pelas diferentes estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado.

Figura 39. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Campo Verde - MT.

A análise de variância dos dados do talhão TA4 revelou efeito significativo de todos os fatores avaliados, inclusive da interação entre os tratamentos e a CE (Tabela 25). Essa interação significa que em diferentes condições de CE, é possível que a resposta em produtividade do algodoeiro seja diferente para cada estratégia adotada. Esse resultado abre espaço para mais investigações, usando a hipótese de que a fusão de diferentes fontes de informação pode trazer recomendações mais eficientes que o uso isolado dos sensores. Entretanto, uma vez que a CE faz parte do modelo como uma covariável e não um tratamento controlado, a interação foi desconsiderada e priorizou-se o estudo do efeito principal dos tratamentos.

Tabela 25. Resumo da análise estatística do efeito das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado na produtividade do algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT.

Fator	Graus de liberdade	Estat. F	P-valor
Tratamento	3	7,72	<0,01
CE 30	1	70,07	<0,01
Tratamento X CE 30	3	8,06	<0,01
Resíduos	160		

Ao realizar-se a comparação múltipla entre médias pelo teste de Tukey foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 26), com destaque para a estratégia de aplicar o N em taxa variável de acordo com o algoritmo com inclinação negativa, que apresentou a maior produtividade. Essa estratégia produziu cerca de 100 kg ha⁻¹ a mais de algodão em caroço que a aplicação em taxa fixa e cerca de 300 kg ha⁻¹ a mais que o uso do algoritmo com inclinação positiva. A estratégia de combinar os dois algoritmos não diferiu estatisticamente da aplicação em taxa fixa.

Tabela 26. Produtividade média de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Tratamento	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Neg-Neg	4.177 A
Fix-Fix	4.070 B
Neg-Pos	3.974 B
Pos-Pos	3.880 C

Valores seguidos da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Esta área apresenta diferenças texturais e historicamente existem regiões no talhão com produtividades distintas, favorecendo a existência de plantas com diferentes acúmulos de biomassa e N, que por consequência gerou maiores diferenças nas doses de N aplicadas, conforme apresentado na Tabela 19. Nesta área as doses totais aplicadas nos tratamentos em taxa variável variaram de menos de 50 até mais de 250 kg ha⁻¹ (Figura 40 e Figura 41), o que mais uma vez mostra que a redistribuição proposta pelo algoritmo está coerente com a amplitude da variabilidade presente na área. Nesta área observa-se que a redistribuição das doses de N pode ser insuficiente para obter-se lucratividade em toda a área, sendo necessária a utilização de um conjunto de outras estratégias de gestão da variabilidade espacial para que os objetivos da agricultura de precisão sejam alcançados.

Figura 40. Distribuição de frequências do total de nitrogênio aplicado em cobertura em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT.

Figura 41. Mapa do total de nitrogênio aplicado em cobertura no algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde – MT.

Neste talhão também observa-se que a produtividade de algodão em caroço apresenta variações relacionadas com os valores de CE (Figura 10), e independentes do sentido de realização da semeadura e dos tratamentos fitossanitários (Figura 42).

Figura 42. Produtividade de algodão em caroço em função das estratégias de redistribuição do fertilizante nitrogenado em algodoeiro cultivado em espaçamento adensado na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

4.5. Avaliação do potencial da aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis de acordo com o vigor vegetativo da cultura

Todas as aplicações foram realizadas de acordo com a metodologia descrita anteriormente, utilizando-se volume de calda médio de 60 L ha⁻¹, valores mínimos de 42 L ha⁻¹ e valores máximos de 78 L ha⁻¹. Locais onde o índice de vegetação da cultura foi menor que 40% do valor médio não receberam aplicação. Observa-se que em função das limitações impostas pela tecnologia de aplicação disponível, a região onde existem variações nas doses é pequena, de modo que se a variação de biomassa for muito grande a aplicação apresentará características de uma aplicação localizada ao invés de uma aplicação em taxa variável plena (Figura 43).

Figura 43. Algoritmo esquemático para aplicação de fitorreguladores em taxa variável.

Ao longo do ciclo da cultura foram realizadas três aplicações de regulador de crescimento (Tabela 27) utilizando-se o produto comercial PIX HC (cloreto de mepiquat, 25% i.a.) e uma aplicação de desfolhante/maturador utilizando-se os produtos comerciais DROPP ULTRA (tidiazurom, 12% i.a. + diurom, 6% i.a.) e FINISH (etephon, 48% i.a. + ciclalinida, 6% i.a.).

Tabela 27. Aplicações de fitorreguladores no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Aplicação	DAE	Produto	Dose média (p.c. L ha ⁻¹)	
			Taxa Fixa	Taxa Variável
Regulador1	80	PIX HC	0,050	0,046
Regulador2	95	PIX HC	0,080	0,053
Regulador3	110	PIX HC	0,120	0,080
Desfolhante	170	DROPP ULTRA	0,500	0,458
Maturador	170	FINISH	2,500	2,292

Observa-se que o consumo dos produtos foi em média 18% menor na aplicação em taxa variável, principalmente em função das áreas não aplicadas, uma vez que a dose média nas áreas aplicadas foi semelhante ao valor de dose da taxa fixa.

A análise estatística dos dados foi realizada para a altura de plantas em pré-colheita, obtida com auxílio de um sistema de mapeamento baseado em sensores ultrassônicos, e para a produtividade de algodão em caroço, obtida pelo mesmo sistema apresentado anteriormente (Figura 12). Os dados foram agrupados para formar polígonos quadrados, tomando-se a média das variáveis de interesse, a fim de reduzir o tempo computacional das análises e também reduzir os efeitos da variabilidade presente em curtas distâncias.

Os modelos levaram em conta os possíveis efeitos da aplicação em taxa variável e da interação com a covariável CE, sendo avaliados quanto a presença de dependência espacial dos resíduos. A matriz de variância-covariância para o modelo com dependência espacial assumiu um modelo exponencial, desconsiderando a existência de efeito pepita. Todos os ajustes foram realizados pelo método da máxima verossimilhança. A escolha do modelo baseou-se no alcance da dependência espacial e nos menores valores do critério de informação de Akaike e do critério de informação Bayesiano.

Para as duas variáveis o melhor ajuste foi obtido no modelo que considerou a dependência espacial dos resíduos (Tabela 28), evidenciando que em experimentos dessa dimensão não se deve assumir que os princípios da estatística clássica são sempre satisfeitos.

Tabela 28. Seleção do modelo para análise estatística do efeito da aplicação de fitorreguladores em taxa variável no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Talhão	Modelo ⁽¹⁾	G.L. ⁽²⁾	Alcance	AIC ⁽³⁾	BIC ⁽⁴⁾
TC5	Prod = Trat. X CE 30	6	-	4391	4413
	Prod = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.*	7	194	4120	4146
TC5	Altura = Trat. X CE 30	6	-	2097	2119
	Altura = Trat. X CE 30 + Cor. Exp.*	7	201	1858	1883

⁽¹⁾Prod: Produtividade de algodão em caroço; Trat: Aplicação de fitorreguladores em taxa fixa ou variável; CE 30: Condutividade elétrica do solo; Cor. Exp.: Matriz de covariância espacial ajustada por modelo exponencial; O asterisco representa o modelo de melhor ajuste. ⁽²⁾G.L.: Graus de liberdade do modelo. ⁽³⁾Critério de informação de Akaike. ⁽⁴⁾Critério de informação Bayesiano.

A análise de variância dos dados revelou que apenas a CE exerceu efeito significativo sobre a produtividade de algodão em caroço e a altura de plantas (Tabela 29). A ausência de resposta à aplicação em taxa variável pode estar relacionada aos limites de variação das doses, imposto pelo mecanismo de controle da taxa variável, o que fez que parte das áreas não recebessem a dose mais adequada. Ainda assim, observa-se que houve redução nos custos com os produtos, sem haver quedas de produtividade, portanto existiram ganhos para a margem de lucratividade da cultura quando utilizou-se a taxa variável.

Tabela 29. Resumo da análise estatística do efeito da aplicação de fitorreguladores em taxa variável na altura final de plantas e na produtividade de algodão em caroço no cultivo de algodoeiro em espaçamento convencional na safra 2014/2015 em um Neossolo Quartzarênico, em Campo Verde - MT.

Fator	Graus de liberdade	Produtividade		Altura	
		Estat. F	P-valor	Estat. F	P-valor
Tratamento	1	0,03	0,55	0,35	0,86
CE 30	1	66,97	<0,01	47,73	<0,01
Tratamento X CE 30	1	1,97	0,16	1,28	0,26
Resíduos	277				

Além da redução no uso dos fitorreguladores, também é importante mencionar que foram observadas outras diferenças no aspecto geral das lavouras no tratamento com aplicação em taxa variável. Essas diferenças foram observadas visualmente (Figura 44), entretanto não foi adotada nenhuma metodologia para mensurar a significância das diferenças, o que poderia ser realizado em futuros trabalhos.

Figura 44. Apodrecimento de estruturas vegetativas devido ao crescimento excessivo em área com plantas com alto vigor vegetativo e ocorrência de plantas daninhas em área com limitações ao desenvolvimento satisfatório do algodoeiro cultivado em 2014/2015, em Campo Verde - MT.

A primeira delas refere-se à redução no apodrecimento de estruturas reprodutivas, principalmente nos locais onde as plantas eram mais vigorosas, em função da redução no porte das plantas e formação de um microclima menos favorável ao desenvolvimento dos agentes patogênicos. Além de afetar a produtividade, esses problemas também podem afetar a qualidade da fibra, uma vez que os patógenos utilizam parte dos constituintes da fibra como fonte de energia, alterando seu aspecto visual e suas características intrínsecas.

A outra diferença refere-se a menor ocorrência de plantas daninhas nas áreas de baixo vigor das plantas, que receberam doses reduzidas ou nenhuma aplicação de fitorreguladores. Nas mesmas condições, a aplicação de doses fixas de fitorreguladores inibiu o desenvolvimento das plantas de algodão, favorecendo assim o desenvolvimento das plantas daninhas. Algumas espécies de plantas daninhas, como o capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus* L.), produzem sementes que se aderem às fibras de algodão, sendo considerados contaminantes de difícil remoção, o que gera descontos ao valor pago pelo produto.

5. CONCLUSÕES

Os dois modelos de sensores utilizados apresentaram desempenho geral satisfatório, com capacidade de prever a altura de plantas, acúmulo de biomassa e N no algodoeiro com valores de R^2 acima de 0,90. Observou-se interação significativa com o espaçamento das fileiras e a fase de desenvolvimento da cultura, existindo, portanto, a necessidade de se conhecer esses parâmetros para que a estimativa seja mais precisa. A performance dos sensores foi inferior em situações de pequena variabilidade na cultura ou de acúmulo de biomassa muito grande.

A resposta do algodoeiro ao nitrogênio aplicado em cobertura variou de acordo com as condições de cultivo de cada experimento. Maiores respostas foram observadas em áreas de médio e baixo potencial produtivo, existindo talhões e partes de talhões em que a aplicação de N não proporcionou incremento de produtividade, enquanto que em outras áreas observou-se aumento de produtividade expresso por uma relação quadrática entre a dose aplicada e a produtividade. Na área com as maiores diferenças, a dose de máximo retorno econômico foi de 0 kg ha⁻¹ na região de alto potencial produtivo, 165 kg ha⁻¹ na região de médio potencial produtivo e 280 kg ha⁻¹ na região de baixo potencial produtivo.

Na análise dos experimentos em nível de fazenda, o melhor ajuste foi obtido no modelo que considera a dependência espacial dos resíduos, evidenciando que em experimentos dessa dimensão não se deve assumir que os princípios da estatística clássica são sempre satisfeitos. Em três áreas não foram observadas diferenças significativas entre a aplicação do N em cobertura em taxa fixa ou usando os algoritmos para aplicação em taxa variável, devido à homogeneidade da área e da interferência de outros fatores. Em uma das áreas observou-se vantagem para a aplicação em taxas variáveis usando o algoritmo que recomenda aplicação de maiores doses de N nos locais em que as plantas apresentam menor desenvolvimento vegetativo. Essa estratégia apresentou produtividade de algodão em caroço cerca de 100 kg ha⁻¹ superior à apresentada pela aplicação em taxa fixa e cerca de 300 kg ha⁻¹ superior à obtida com a aplicação em taxas variáveis usando o algoritmo que recomenda aplicação de maiores doses de N nos locais em que as plantas apresentam-se mais vigorosas.

A aplicação de fitorreguladores em taxas variáveis não apresentou efeito significativo na produtividade de algodão em caroço, entretanto o volume consumido dos produtos foi em média 18% menor na aplicação em taxa variável, principalmente em função das áreas que não foram aplicadas por apresentarem desenvolvimento vegetativo reduzido. Além disso, observou-se redução dos problemas com ocorrência de plantas daninhas e com o apodrecimento de estruturas reprodutivas, possivelmente melhorando a qualidade da fibra produzida.

REFERÊNCIAS

- ANSELMO, J. L.; ANDRADE, B. G. M.; HOLANDA, H. V. de; MAGALHÃES, H. J. S.; BOTTARI, D.; SILVA, D. F. G. Sistemas de cultivo (adensado x convencional) na cultura do algodoeiro. In: ANSELMO, J. L. (Coord.). Algodão, milho safrinha e culturas de inverno 2011/2012. 2. ed. Chapadão do Sul: Fundação Chapadão, 2012. p. 23-25. (Pesquisa, tecnologia, produtividade).
- BOQUET, D. J.; MOSER, E. B.; BREITENBECK, G. A. Boll weight and within-plant yield distribution in field-grown cotton given different levels of nitrogen. *Agronomy Journal*, Madison, v. 86, p. 20-36, 1994.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; JASPER, J.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. D. G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I-plant nutrition and dry matter production. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n° 5, p. 1288-1298. 2013.
- CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed). Algodão no Cerrado do Brasil. Brasília, DF: ABRAPA. p. 581-648. 2007.
- CHIAVEGATO, E. J.; BERNARDES, M. S.; CARVALHO, H. da R. Estratégias para melhorar o aproveitamento da luminosidade na cultura do algodão. In: ECHER, F. R. (Ed.). O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes. IMAmt - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT. 2014. p. 43-61.
- CHIAVEGATO, E. J.; MELO, F. L. de A.; CARVALHO, H. DA R. Uso de reguladores de crescimento. In: BELOT, J.L. (Ed.). Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso: safra 2012/13. IMAmt - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT, Safra 2012/13. 2012. 5: 162-166.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. v.2, n.12, Brasília, DF, p. 48-58, 2015. Acesso em 10 Dez. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>
- DIAS, A. R.; THEODORO, G. F. Controle da Ramulária em Algodoeiro Cultivado em Sistema Adensado na Região dos Chapadões. In: ANSELMO, J. L. Algodão, milho safrinha e culturas de inverno 2012/2013. 2. ed. Chapadão do Sul: Fundação Chapadão, 2013. p. 71-73.
- ECHER, F. R.; ROSELEM, C. A.; WERLE, R. Estimativa da dose de regulador a ser aplicada no algodoeiro em função da condição de crescimento. IMAmt - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT, 2013. (IMAmt. Circular técnica, n. 1).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília, 2013. 353p.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Faostat: Food and agricultural commodities production. Acesso em 10 Jan. 2015. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>
- GIMENEZ, L. M.; CORTINOVE, L. Agricultura de Precisão na Produção de Grãos e Fibras. IN: SENTELHAS, P. C. et al. FUNDAÇÃO MATO GROSSO: Boletim de pesquisa 2015/2016. Santa Cruz do Sul – RS. 510 p. Editora Gazeta. 2015. ISSN: 2446-8630.
- HOOGERHEIDE H. C.; FRANCISCO E. Manejo de nutrientes para o algodoeiro de alta produtividade. *Informações Agronômicas*, n° 141, IPNI, Piracicaba, 5 p., 2013.
- HORLER, D. N. H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red-edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, v. 4, p. 273-288. 1983.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality measurements of light on the forest floor. *Ecology*, v. 50, p. 663-666. 1969.

- KOPPEN, W. P. Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.
- LAMAS, F. M.; FERREIRA, A. C. de B. Reguladores de crescimento na cultura do algodoeiro. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 4 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 121)
- PAZETTI, G.; FERNANDO, J. Manejo de desfolha. In: Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso. IMAm - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT, Safra 2012/13. 2012. p. 174-178.
- PIEPHO, H. P.; BÜCHSE, A.; RICHTER, C. A mixed modelling approach to randomized experiments with repeated measures. *Journal of Agronomy & Crop Science* 190, 230–247. 2004.
- PIEPHO, H. P., RICHTER, C.; SPILKE, J.; HARTUNG, K.; KUNICK, A.; THÖLE, H. Statistical aspects of onfarm experimentation. *Crop and Pasture Science*, 62, 721–735. 2012.
- 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.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2014.
- RICHTER, C.; KROSCHEWSKI, B.; PIEPHO, H. P.; SPILKE, J. Treatment comparisons in agricultural field trials accounting for spatial correlation. *The Journal of Agricultural Science*. 153, 1187–1207. 2015.
- SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. Análises químicas em plantas. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56 p.
- STAUT, L. A.; LAMAS, F. M.; KURIHARA, C. H.; REIS JÚNIOR, R. A. Adubação nitrogenada em cobertura na cultura do algodoeiro em sistema plantio direto. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 4p. (Comunicado Técnico, 67)
- WENDEL, J. F.; BRUBAKER, C. L.; SEELANAN, T. The origin and evolution of *Gossypium*. In: *Physiology of Cotton*, edited by James McD. Stewart, Derrick M. Oosterhuis, James J. Heitholt and Jackson R. Mauney, Springer, 2010. pp. 1-18.
- ZANCANARO, L.; KAPPES, C. Sistemas de cultivo do algodoeiro. In: Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso. IMAm - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT, Safra 2012/13. 2012. p. 34-37.
- ZANCANARO, L.; TESSARO, L. C. Calagem e adubação. In: MORESCO, E. (Org.). Algodão: pesquisas e resultados para o campo. Cuiabá, FACUAL, p. 57-81, 2006.

ANEXOS

ANEXO A. Gráfico do coeficiente de variação da aplicação do fertilizante Ureia em função da largura de faixa adotada e simulação da distribuição do fertilizante Ureia sobre o solo utilizando 24 m de distância entre cada passada.

ANEXO B. Gráfico do coeficiente de variação da aplicação do fertilizante Yarabela™ em função da largura de faixa adotada e simulação da distribuição do fertilizante sobre o solo utilizando 30,4 m de distância entre cada passada.