

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FERTILIZAÇÃO NITROGENADA DO ALGODOEIRO
PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO NO OESTE DA
BAHIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leandro Ricardo de Nadai Geib

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

FERTILIZAÇÃO NITROGENADA DO ALGODOEIRO PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO NO OESTE DA BAHIA

Leandro Ricardo de Nadai Geib

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**FERTILIZAÇÃO NITROGENADA DO ALGODOEIRO PRESCRITA
POR SENSOR ÓPTICO NO OESTE DA BAHIA**

elaborada por
Leandro Ricardo de Nadai Geib

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Telmo Jorge Carneiro Amado
(Presidente/Orientador)

Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM/CESNORS)

Christian Bredemeier, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2014

DEDICATÓRIA

Dedico a meus pais,
Adalberto e Claudia,
pelo apoio incondicional e por
serem exemplos de amor e perseverança.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me iluminar e guiar durante toda minha vida, principalmente nos últimos sete anos, os quais foram de muita mudança em minha vida profissional.

Aos meus pais, Claudia e Adalberto, pelo apoio, pela dedicação e por nunca terem deixado de acreditar em meu esforço e em minha vontade de aprender.

Aos meus irmãos, avós e tios, que, apesar da saudade e da distância, foram também uma fonte de inspiração, entendendo pacientemente meus curtos momentos de visitas familiares e minha ausência.

A minha querida namorada, Tania, que me acompanhou e apoiou, compreendendo os momentos nos quais fiquei ausente.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em especial ao professor Telmo Amado, por ter oferecido esta oportunidade de ampliar o meu conhecimento profissional e pelo ensinamentos que levarei pelo resto da vida.

Aos colegas Jardes Bragagnolo, Vitor Girardello e Paulo Alba, que, com muita paciência, gastaram horas compartilhando seus conhecimentos. Em especial, ao Jardes, pelas horas de discussões sobre o tema.

Aos outros colegas de pós-graduação, Tiaguinho, Douglas, Cristiano Keller, Diego, Horbe, Fernando, Brian, Francine, Rafael e Ademir.

Aos colegas de graduação, Mazuco, Critiano Ertel, Raí Schalbert, Cristian “Pé de Milho”, Eduardo, Vinicius, Fábio, Sebanazi, entre outros, que, de alguma forma, colaboraram para minha formação.

Ao amigo Finamor, pela amizade e pelos ensinamentos para a vida.

Aos colegas que trabalham na Stara: Éder Sepulveda, pela oportunidade de trabalhar no projeto Manejo Avançado Stara (MAS), Fabiano Tabaldi, grande companheiro de trabalho a campo, ajudando a desbravar o cerrado brasileiro e ao Rafael Magni pela amizade.

Ao senhores Martin e seu filho, pela disponibilidade da área, e ao Rodrigo, pela amizade, pela ajuda e pelos ensinamentos, principalmente em relação à cultura do algodoeiro.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

FERTILIZAÇÃO NITROGENADA DO ALGODOEIRO PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO NO OESTE DA BAHIA

AUTOR: LEANDRO RICARDO DE NADAI GEIB
ORIENTADOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de fevereiro de 2014.

A nutrição nitrogenada do algodoeiro afeta diretamente a produtividade da cultura. Decisões baseadas no uso de sensores são uma alternativa para aumentar a eficiência da fertilização nitrogenada em diversas culturas. No entanto, para o algodão, a acurácia da estimativa do estado nutricional e dos estádios vegetativos mais adequados para a realização das leituras ainda não estão bem definidos. Nesse contexto, o presente trabalho teve os seguintes objetivos: I - avaliar a eficácia de um sensor óptico na estimativa do estado nutricional da cultura do algodoeiro submetido a diferentes doses de nitrogênio (N); II – avaliar em quais estádios fenológicos o sensor óptico possui maior eficiência; III - estabelecer curva de resposta de produtividade no algodoeiro em relação à aplicação de N e IV - estimar valores de referências para utilização do sensor óptico na prescrição de fertilizantes em taxa variada. O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2012/13 em um Latossolo Vermelho Amarelo, no oeste do estado da Bahia, sob clima tropical com precipitação anual de 1600 mm ano⁻¹ e temperatura média anual em torno de 21°C. O experimento foi realizado em três locais, e o delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram nas seguintes doses de N: 0, 45, 90, 130, 150, 180 e 220 kg ha⁻¹ aplicadas aos 43 dias após a semeadura (DAS) na área 1 e aos 32 DAS nas áreas 2 e 3. As leituras de índice de vegetação (IV) foram realizadas em três épocas, correspondentes aos 63, 75 e 97 DAS na área 1 e aos 45, 57 e 80 DAS nas áreas 2 e 3, utilizando o sensor óptico N-Sensor ALS® (YARA). Adjacente aos estádios e pontos de leitura de IV, foram realizadas coletas de plantas para determinar a produção de matéria seca (MS) e a quantidade de N absorvido e avaliar a altura de planta e a produtividade do algodoeiro. A leitura do sensor e os demais fatores avaliados foram submetidos à análise de regressão pelo programa estatístico Sigma Plot 11. As doses de N fertiliz

aplicadas alteraram significativamente os atributos vegetativos avaliados. A leitura do IV do sensor óptico apresentou elevada correlação com o estado nutricional da cultura determinado pelas doses de N nas três áreas avaliadas para os diferentes estádios de avaliação. A leitura do IV obtida pelo sensor também apresentou elevada correlação com os parâmetros altura de planta, MS e N absorvido. A produtividade da cultura do algodoeiro apresentou um ajuste quadrático com as doses de N nos três experimentos. A calibração preliminar sugere que o valor de IV crítico seria igual a 60 para o estádio F1 na média das três áreas estudadas.

Palavras-chave: N Sensor. Nitrogênio. Índice de vegetação. Máxima eficiência econômica. *Gossypium hirsutum* L.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

NITROGEN FERTILIZATION OF COTTON PRESCRIBED BY OPTICAL SENSOR IN THE WEST OF BAHIA

AUTHOR: LEANDRO RICARDO DE NADAI GEIB
ADVISOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Santa Maria, February 25th, 2014.

Proper nutrition nitrogen in cotton directly affects obtain high productivity of the crop. Decision making based on the use of sensors is an alternative to increase the efficiency of fertilization with this nutrient, however, the accuracy of the sensors and the vegetative stages most suitable for the realization of the readings are not well defined. In this context the present study had the following objectives: I - Evaluate the effectiveness of an optical sensor to estimate the nutritional status of cotton crop under different N rates; II- Which phenological stages the optical sensor has higher efficiency. III - Establish response curve in the cotton productivity in relation to nitrogen and estimate reference values to use the optical sensor on the prescription variable rate fertilizer. The experiment was conducted in the agricultural year 2012/13 on a Oxisol in the western state of Bahia. The experiment was conducted at three sites and experimental design was a randomized block design with seven treatments and three replications. Treatments consisted of the following N rates: 0, 45, 90, 130, 150, 180 and 220 kg ha⁻¹ applied at 43 days after sowing (DAS) in area 1 and 32 DAS in areas 2 and 3. Readings vegetation index (IV) were carried out in three seasons, corresponding to 63, 75 and 97 DAS in area 1 and 45, 57 and 80 DAS in areas 2 and 3, using the optical sensor N-Sensor ALS® (YARA) . Adjacent stages and the read points IV, samplings to determine dry matter (DM) were taken, and measurement of the absorbed nitrogen and plant height, furthermore, the determination of the yield of cotton was carried out. The sensor reading and the other factors evaluated were subjected to regression analysis by the statistical program Sigma Plot 11. The N fertilizer applied significantly altered the vegetative attributes evaluated. Reading the IV optical sensor showed high correlation with crop nutritional status determined by N does in the three areas evaluated for the different stages of evaluation. Reading the vegetation index obtained by the sensor also showed high correlation with the

parameters plant height, DM and N absorbed. The productivity of cotton crop showed a quadratic fit with the N levels in all experiments. The preliminary calibration value suggesting that the critical IV would be equal to 60 for the stage F1 in the middle of the three areas studied.

Keywords: N Sensor. Nitrogen. Vegetation index. Maximum economic efficiency. *Gossypium hirsutum* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitações diárias e acumuladas ocorridas durante o ciclo da cultura do algodoeiro para área 1 (a) e área 2 e 3 (b) em Correntina, Bahia, na safra agrícola de 2012/2013.	23
Figura 2 - Localização dos três experimentos em Correntina, Bahia.	25
Figura 3 - Croqui da área experimental e ilustração do escaneamento realizado pelo sensor.	27
Figura 4 - Conjunto Hércules 5.0® + N-sensor® realizando as leituras nas parcelas.	30
Figura 5 - Relação entre as doses de N aplicadas e o IV em três estádios da cultura do algodoeiro. Primeira Avaliação (45 DAS); Segunda Avaliação (57 DAS); Terceira Avaliação (80 DAS) para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	38
Figura 6 - Relação entre a MS e o IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	41
Figura 7 - Relação entre o N absorvido e o IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	44
Figura 8 - Relação entre o teor de N nas plantas e IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	46
Figura 9 - Relação entre a altura de plantas e o IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	48
Figura 10 - Efeito das doses de N na produtividade do algodoeiro em caroço para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c). Linha pontilhada representando a máxima eficiência econômica (MEE) (Correntina, Bahia, 2013).	61
Figura 11 - Relação entre o IV e a produtividade do algodão para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 1 (Correntina, Bahia, 2013).	66
Figura 12 - Relação entre o IV e a produtividade do algodão para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 2 (Correntina, Bahia, 2013).	67
Figura 13 - Relação entre a produtividade do algodão em o índice de vegetação para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 3 (Correntina, Bahia, 2013).	68
Figura 14 - Relação entre as doses de N aplicadas e o IV em três estádios da cultura do algodoeiro. Primeira Avaliação (45 DAS); Segunda Avaliação (57 DAS); Terceira Avaliação (80 DAS) para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos experimentos conduzidos nas áreas experimentais.	26
Tabela 2 - Média dos atributos químicos avaliados quando da implantação dos experimentos na profundidade de 0-0,15m (Correntina, Bahia, 2013).	27
Tabela 3 - Data das três avaliações, dias após a semeadura e estágio fenológico em que se encontrava a cultura do algodoeiro em cada área experimental (Correntina, Bahia, 2013).	29
Tabela 4 - Coeficientes de determinação entre doses de N aplicadas e atributos vegetativos na área 1 (Correntina, Bahia, 2013).	32
Tabela 5 - Coeficientes de determinação entre as doses de N aplicadas e os atributos vegetativos na área 2 (Correntina, Bahia, 2013).	33
Tabela 6 - Coeficientes de determinação entre as doses de N aplicadas e os atributos vegetativos na área 3 (Correntina, Bahia, 2013).	34
Tabela 7 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha ⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha ⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 1 (Correntina, Bahia, 2013).	63
Tabela 8 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha ⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha ⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 2 (Correntina, Bahia, 2013).	64
Tabela 9 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha ⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha ⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 3 (Correntina, Bahia, 2013).	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 HIPÓTESE	16
3 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
3.1 Objetivo geral	17
3.2 Objetivos específicos	17
4 CAPÍTULO 1 – FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E ATRIBUTOS DO ALGODOEIRO AVALIADOS POR SENSOR ÓPTICO	18
4.1 Resumo	18
4.2 Introdução	19
4.3 Material e métodos	22
4.3.1 Caracterização da área experimental	22
4.3.2 Instalação do experimento	24
4.3.3 Delineamento experimental, determinações realizadas e parâmetros avaliados	27
4.3.4 Análises dos resultados	30
4.4 Resultados e discussão	31
4.4.1 Relações entre a dose de N aplicada e os parâmetros vegetativos do algodão	31
4.4.2 Relações entre a dose de N fertilizante aplicada e o índice de vegetação obtido pelo sensor óptico	36
4.4.3 Relações entre os atributos vegetativos e o índice de vegetação obtido pelo sensor óptico	39
4.5 Conclusões	49
4.6 Literatura citada	50
5 CAPÍTULO 2 - EFICIÊNCIA DO SENSOR ÓPTICO EM ESTIMAR O POTENCIAL PRODUTIVO E DETERMINAR A LEITURA DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO CRÍTICA NO ALGODOEIRO	56
5.1 Resumo	56
5.2 Introdução	57
5.3 Material e métodos	59
5.3.1 Avaliações de produtividade da cultura do algodoeiro	59
5.3.2 Análises dos resultados	59
5.4 Resultados e discussão	60
5.4.1 Determinação da máxima eficiência econômica	60
5.4.2 Eficiência do sensor óptico em estimar o potencial produtivo	63
5.4.3 Determinação dos valores críticos de índice de vegetação por estágio fenológico	69
5.5 Conclusões	71
5.6 Literatura citada	72
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO GERAL

O algodoeiro é, historicamente, uma das principais plantas domesticadas pelo homem, com registros de seu uso há mais de 4.000 anos, e, atualmente, é cultivado comercialmente em mais de 65 países. Essa cultura caracteriza-se por apresentar rigorosos critérios de avaliação de qualidade quando da sua comercialização, associados a elevados custos de produção (ROSSATO, 2011). No cenário agrícola atual, o algodoeiro é uma das dez principais culturas fornecedoras de fibra, óleo e proteínas, ocupando, no Brasil, uma área de aproximadamente 1,4 milhão de hectares (ABRAPA, 2012), com produção estimada de 1,9 milhão de toneladas em pluma. No cenário mundial, o Brasil destaca-se como o quinto maior produtor e como o terceiro maior exportador de algodão. Além disso, o algodão brasileiro evidencia-se por alcançar a maior produtividade média mundial para cultivos em sequeiro. Aproximadamente 35% do algodão produzido no Brasil destina-se à exportação, com destaque para a produção dos estados do Mato Grosso e da Bahia, os quais são responsáveis por 82% da produção nacional (ABRAPA, 2012).

A área atualmente cultivada com algodão corresponde a 35% do total cultivado no final da década de 70, porém, a produção atual é quatro vezes superior. Este resultado é atribuído ao uso de tecnologias na cotonicultura, que resultou em um incremento de 7,7 vezes na produtividade no interstício de tempo considerado. Este incremento em produtividade é estimado na ordem de $40,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos últimos 30 anos. Dentre os fatores responsáveis por essa evolução na produtividade do algodão, destacam-se: o investimento em biotecnologia, as novas técnicas de manejo, o elevado investimento na lavoura e a profissionalização dos agricultores (ABRAPA, 2012).

Os avanços nas técnicas e nos equipamentos utilizados para realização da agricultura de precisão (AP) têm sido considerados um dos aspectos responsáveis pelo aumento da produtividade do algodão e das demais culturas agrícolas. A AP tem como princípio o gerenciamento localizado dos sistemas agrícolas a partir do uso de recursos como o mapeamento dos fatores de produção aliados à utilização de ferramentas para a tomada de decisão e aplicação localizada de insumos. A produtividade das culturas, do ponto de vista histórico, tem sido estudada como o

principal fator de variação espacial e temporal (BLACKMORE, 1994). A divisão das áreas agrícolas na forma de talhões reflete a tentativa de identificar locais homogêneos quanto à fertilidade ou quanto à incidência de doenças e plantas daninhas (FRAISSE, 1998).

Molin (2001) descreve a AP como um conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados com o intuito de aperfeiçoar as atividades realizadas na lavoura e no sistema de produção, que tem como componente central o gerenciamento da variabilidade espacial e temporal da produção e dos fatores interligados a ela.

De acordo com Portz (2011), a agricultura atual ainda maneja as áreas como homogêneas, fazendo perdurar o conceito da necessidade média para a aplicação de insumos, não considerando as necessidades específicas de cada sítio da lavoura. A fertilização à dose variável apresenta um elevado potencial de aumentar a produtividade das culturas, assim como para racionalizar os corretivos da acidez do solo (HEERMANN et al., 2002). Dentre os fatores mais significativos que podem ser variados pelo produtor, com o intuito de influenciar a economia dos sistemas produtivos, destaca-se a aplicação correta de fertilizantes nitrogenados nas culturas agrícolas.

A amostragem de solo em grade fornece uma base acurada para a geração de mapas de aplicação de fertilizantes em taxa variável. Entretanto, medidas indiretas e não destrutivas fornecidas pelo uso de sensores são uma alternativa para a tomada de decisão sobre o manejo de determinada cultura com maior resolução e menor custo (MOGES et al., 2004). O sensoriamento remoto baseia-se na tomada de informações sobre um objeto sem ocorrer contato físico com o mesmo (COLWELL, 1983). Essas informações obtidas, normalmente, dependem da energia eletromagnética refletida pelos alvos a serem determinados (CAMPBELL, 1987). O sensor remoto é um dispositivo que responde à radiação eletromagnética de determinada faixa do espectro eletromagnético (STEFFEN et al., 1981). As frações de energia transmitida, refletida e absorvida pelos objetos tendem a variar de acordo com suas propriedades físico-químicas, sua estrutura e sua posição em relação à fonte de radiação incidente (NOVO, 1992).

Na cultura do algodoeiro, o uso de fertilizantes e corretivos é responsável por 30% do custo com insumos e por cerca de 15% do custo total de produção da cultura. A nutrição nitrogenada é um dos frequentes limitantes da produtividade do algodoeiro, tanto em áreas irrigadas como no cultivo em sequeiro. Entretanto, aplicações elevadas

podem reduzir a produção e a qualidade da fibra (HUTMACHER et al., 2004). De acordo com Tisdale et al. (1993), dentre os nutrientes utilizados pelas plantas, o nitrogênio (N) é considerado o mais importante e essencial nutriente para o desenvolvimento adequado das culturas. Isso é decorrente do fato de o N ser um integrante da clorofila, pigmento responsável pela absorção da energia luminosa necessária para os processos fotossintéticos (PORTZ, 2011).

Quando o suprimento de N excede a demanda da cultura, o excesso pode ser perdido por escoamento superficial e lixiviação, resultando na contaminação do lençol freático (WOOD et al., 1993). Para Kluthcouski et al. (2006), em condições adversas, principalmente em relação à umidade, à temperatura, à época e ao método de aplicação do fertilizante, o N pode ser perdido facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação no solo. Dessa forma, a eficiência da utilização desse nutriente pelas plantas geralmente é baixa, situando-se entre 50 e 60%, podendo diminuir ainda mais em sistemas mal manejados.

Nesse sentido, a avaliação do estado nutricional da cultura é ferramenta essencial para o aprimoramento da fertilização. Segundo Wright et al. (2004), o sensoriamento remoto é considerado uma ferramenta acurada para o monitoramento das condições nutricionais das culturas agrícolas. Desse modo, quando o N é utilizado adequadamente, juntamente com os demais nutrientes, pode acelerar o desenvolvimento da cultura, resultando em maior retorno econômico.

A deficiência de N causa mudanças no desenvolvimento e na composição das folhas das plantas e, indiretamente, mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (TARPLEY; REDDY; SASSENATH-COLE, 2000). Assim, métodos que avaliam a distribuição espectral de radiação refletida pelas plantas são considerados indicadores adequados para estimar doses de N a serem aplicadas nas culturas (SCHÄCHTL et al., 2005).

Atualmente, existem diversos sensores ópticos para estimar o N na planta, dentre eles o N-Sensor[®] Yara, que foi o primeiro sensor criado com esse intuito, lançado no mercado no ano de 1999. Nos dias atuais, o N-Sensor[®] Yara encontra-se na sua segunda geração e é considerado um dos principais sensores destinados à aplicação de N em taxa variável e em tempo real, especialmente para culturas anuais (PORTZ, 2011).

Nesse contexto, o presente trabalho teve os seguintes objetivos: I - avaliar a eficácia de um sensor óptico na estimativa do estado nutricional da cultura do

algodoeiro submetido a diferentes doses de N, II - avaliar em qual estágio de desenvolvimento o sensor óptico possui maior precisão de uso, III - estabelecer curva de resposta de produtividade no algodoeiro em relação à aplicação de N em diferentes áreas para determinação da máxima eficiência econômica e IV - estimar índice de vegetação (IV) crítico para utilização do sensor óptico na prescrição de fertilizantes em taxa variada na cultura do algodoeiro.

2 HIPÓTESE

A hipótese que pauta este trabalho é a de que a fertilização nitrogenada influencia os atributos vegetativos da cultura do algodoeiro e, por meio do uso de sensor óptico, é possível estimar o estado nutricional da cultura, gerenciando a fertilização à dose variada, tornando-se uma alternativa a fertilização uniforme utilizada pelos agricultores no cerrado brasileiro.

3 OBJETIVOS DO TRABALHO

3.1 Objetivo geral

Obter informações a partir de sensor óptico de reflectância vegetal que correlacionem a demanda de N pela cultura com os referentes valores obtidos pelo sensor, visando à aplicação de insumos nitrogenados em taxa variável e em tempo real na cultura do algodoeiro.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade do sensor de detectar a variabilidade dos atributos vegetais, tais como produção de matéria seca, quantidade de N absorvido, teor de N no tecido e altura de plantas;
- avaliar quais os estádios de desenvolvimento mais apropriados para diagnosticar o estado nutricional do algodão, utilizando o N-Sensor e visando à prescrição da dose variável de N;
- estabelecer curva de resposta de produtividade no algodoeiro em relação à aplicação de N em diferentes áreas para determinação da dose de máxima eficiência econômica;
- estimar índice de vegetação (IV) crítico para prescrição de fertilizantes em dose variável na cultura do algodoeiro.

4 CAPÍTULO 1 – FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E ATRIBUTOS DO ALGODOEIRO AVALIADOS POR SENSOR ÓPTICO

4.1 Resumo

O uso de sensores na avaliação da nutrição nitrogenada da cultura do algodoeiro surge como uma alternativa para aumentar a eficiência agrônômica da fertilização. Porém, a eficiência dos sensores e os estádios vegetativos mais adequados para realização das leituras visando à prescrição da dose variável ainda não estão bem definidos para a cultura. Este trabalho teve o objetivo de avaliar a eficiência de um sensor óptico na estimativa do estado nutricional da cultura do algodoeiro submetido a diferentes doses de N fertilizante e determinar o estágio de desenvolvimento em que o sensor óptico possui maior sensibilidade, visando fornecer subsídios para prescrição da dose variável de N. O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2012/13 em um Latossolo Vermelho Amarelo, no oeste do estado da Bahia. O experimento foi realizado em três locais e o delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com sete tratamentos e três repetições. Cada parcela experimental possuía dimensões de 27 m x 27 m. Os tratamentos consistiram das seguintes doses de N: 0, 45, 90, 130, 150, 180 e 220 kg ha⁻¹ aplicadas aos 43 dias após a semeadura (DAS) na área 1 e aos 32 DAS nas áreas 2 e 3. As leituras de índice de vegetação (IV) foram realizadas em três épocas, correspondentes aos 63, 75 e 97 DAS na área 1 e aos 45, 57 e 80 DAS nas áreas 2 e 3, por meio do sensor óptico N-Sensor ALS[®] (YARA). Adjacente aos estádios fenológicos foram realizadas coletas de plantas para determinação da produção de matéria seca (MS), quantidade de N absorvido e altura de plantas. As leituras de IV e os demais fatores avaliados foram submetidos à análise de regressão pelo programa estatístico Sigma Plot 11. As doses de N aplicadas alteraram significativamente os atributos vegetativos avaliados. A leitura do IV do sensor óptico apresentou elevada correlação com o estado nutricional do algodão nas três áreas avaliadas para os diferentes estádios de avaliação. A leitura do IV obtida pelo sensor ainda apresentou elevada correlação com

os parâmetros altura de planta, MS e N absorvido. A eficiência mais elevada do sensor foi no estágio F1, considerando a prescrição de fertilização nitrogenada.

Palavras-chave: N Sensor. Estádio fenológico. Índice de vegetação. Nitrogênio. *Gossypium hirsutum* L.

4.2 Introdução

O N é um nutriente essencial para o desenvolvimento do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), sendo requerido em quantidades elevadas. Em média, são extraídos 67 kg de N para cada tonelada de algodão em caroço (CARVALHO; FERREIRA; STAUT, 2007).

Ao considerar a lavoura uniforme em decorrência do manejo convencional adotado, a variabilidade espacial dos diversos fatores produtivos é desconsiderada, com destaque aos fatores microclimáticos como temperatura, umidade e exposição solar, e os de solo, como acidez (pH), teor de MOS, textura e mineralogia, fatores que afetam a mineralização do N orgânico do solo e o suprimento de N as culturas (JENKINSON; AYANABA, 1977; BAYER et al., 2006). Assim, o suprimento de N as plantas é descontínuo e incerto, sendo regulado pelos processos de mobilização/imobilização dos resíduos de culturas antecessoras (AITA; GIACOMINI, 2003).

De maneira semelhante, tanto a deficiência como o excesso de suprimento de N afetam negativamente o crescimento das plantas de algodoeiro (REDDY et al., 2004). Segundo Staut e Kurihara (2001), quando o N é aplicado em doses elevadas, o desenvolvimento vegetativo da planta aumenta em detrimento da produção, ocasionando, ainda, a formação tardia dos frutos do algodoeiro. A deficiência de N antes do aparecimento do primeiro botão floral ocasiona atraso significativo no ciclo da cultura do algodoeiro (MALIK; EVENSON; EDWARDS, 1978), além da redução de unidades reprodutivas devido à redução do índice de área foliar (IAF) (JACKSON; GERIK, 1990; GERIK et al., 1994).

Em termos de custos de produção, a utilização de fertilizantes e corretivos é responsável por 30% do custo com insumos e por cerca de 15% do custo total de

produção da cultura (CARVALHO, FERREIRA, STAUT, 2007; ABRAPA, 2012). Na busca de elevadas produtividades às expensas do uso de insumos com preços elevados, fazem-se necessários a racionalização e o incremento da eficiência no uso dos recursos. Esse resultado pode ser atingido por meio do emprego de técnicas modernas de gerenciamento da lavoura, como as proporcionadas pela agricultura de precisão (AP).

Atualmente, novas tecnologias baseadas em ferramentas de sensoriamento remoto são amplamente utilizadas. Dentre essas ferramentas, destaca-se a análise de reflectância vegetal para determinação de IV como indicadores do estado nutricional das culturas (ZHAO et al., 2005)

O sensoriamento remoto tem sido utilizado com o intuito de estimar variáveis das culturas, como radiação fotossinteticamente ativa, IAF, conteúdo de clorofila nas folhas (TUMBO; WAGNER; HEINEMANN, 2002), cobertura do solo, acumulação total de matéria seca (TUCKER et al., 1981), conteúdo de água, produtividade, conteúdo de nitrogênio (SOLIE et al., 2002) e falhas de semeadura (FRASSON, 2007).

Uma das alternativas de sensoriamento remoto é a espectrometria óptica, que se baseia no fato de os pigmentos como a clorofila absorverem a radiação nos comprimentos de onda dentro do espectro do visível, enquanto parte da radiação no infravermelho próximo é refletida pela folha (MINOLTA, 1989). Desse modo, a determinação da clorofila, indiretamente, determinaria o estado nutricional da planta, reiterando que a maior parte do N é encontrada nessa molécula (MINOLTA, 1989; RAMBO et al., 2004).

O conhecimento da variabilidade espacial do estado nutricional das plantas é valioso para a prescrição de fertilização à dose variável (LINK; JASPER; REUSCH, 2005). Com isso, o uso de sensores tem sido intensificado nos últimos anos, aumentando o número de estudos visando à otimização de bandas e índices espectrais com mais sensibilidade para estimar o conteúdo de N nas culturas (REUSCH, 2003; SCHMIDHALTER et al., 2003; MISTELE, GUTSER, SCHMIDHALTER, 2004).

A utilização de sensores ópticos na estimativa dos parâmetros de planta avaliados durante o desenvolvimento da cultura pode auxiliar na decisão de manejo (ZHAO et al., 2005), motivo pelo qual inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas para estabelecer fertilização nitrogenada à dose variada em áreas agrícolas (ARGENTA et al., 2003; FREEMAN, 2003; MELCHIORI et al., 2005; POVH et al., 2008, MAYFIELD;

TRENGOVE, 2009; MOLIN et al., 2010; PORTZ, 2012 BRAGAGNOLO et al., 2013; GROHS et al., 2009).

Vários sensores ópticos vêm sendo utilizados para determinação da fertilização nitrogenada das culturas agrícolas. Dentre eles, evidencia-se o N-sensor[®] Yara (YARA INTERNATIONAL ASA, OSLO, NORWAY), comercializado em mais de 20 países, cujo uso mais intenso se dá nas culturas do trigo, cevada, centeio, milho, batata e canola.

O N-Sensor[®] ALS é um sensor multiespectral acoplado ao distribuidor que prescreve a dose variável de N (BERNTSEN et al., 2006). A avaliação realizada por este sensor é feita através de escaneamento contínuo de acordo com o deslocamento do trator. Este equipamento é constituído por um transmissor que emite luz de xênon, com fachos de luz na frequência de 10 Hz, fornecendo luz multiespectral (650-1100 nm) de alta intensidade e um detector com dois filtros de interferência e fotodiodos com 730 e 760 nm de comprimento de onda que garante leituras estáveis enquanto ocorre mudança de condições de irradiância (ZILLMAN et al., 2006). Segundo Jasper, Reusch e Link (2009), a relação da reflectância dos comprimentos de onda de 730 e 760 nm, utilizadas pelo N-Sensor[®] ALS, foi a que melhor estimou a quantidade de N absorvida pelo trigo. Estudos conduzidos por Portz, Molin e Jasper (2012) demonstraram elevados coeficientes de determinação entre o IV obtido pelo N-Sensor[®] ALS com a MS e com a quantidade de N absorvido pela cana de açúcar. Porém, este sensor apresentou menor eficiência quando a quantidade de biomassa foi reduzida, em estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, ou quando a quantidade foi muito elevada, em estádios avançados. Isso se deve ao fato de que o dossel vegetativo denso passa a absorver a luminosidade emitida pelo sensor óptico, não havendo, portanto, refletividade.

Dentre as vantagens da fertilização nitrogenada pelo uso do N-Sensor[®], sobressai-se o incremento de produtividade, situado entre 3,0 a 13,0%, aliado à redução na quantidade de N aplicada em até 14,0% (SINGH et al., 2006). Em estudos realizados por Mayfield e Trengove, (2009) e Jørgensen e Jørgensen, (2007), os autores reportaram incrementos na produtividade dos cereais variando de 0,8 a 5,1%. Mayfield e Trengove (2009), na cultura do trigo, e Portz, Molin e Jasper (2012), na cultura da cana-de-açúcar, verificam elevadas correlações ($r = 0,74$ a $0,96$) entre as leituras do N-Sensor e a quantidade N absorvido.

No Brasil, ainda existem poucos relatos de trabalhos realizados com sensor óptico na cultura do algodão. Assim, este estudo objetivou avaliar a eficiência do N-Sensor na estimativa do estado nutricional da cultura do algodoeiro submetido a diferentes doses de N, além de determinar o estágio de desenvolvimento em que o sensor óptico possui maior eficiência, a fim de fornecer subsídios à fertilização nitrogenada à dose variável.

4.3 Material e métodos

4.3.1 Caracterização da área experimental

O presente estudo foi conduzido em três áreas experimentais pertencentes à Fazenda BRASHOLANDA, localizada no oeste baiano, no município de Correntina, com coordenadas geográficas de 13° 48.580' S; 46° 1.012' O e com cerca de 960 m de altitude. As áreas experimentais apresentavam 0,5 km entre si.

A região é caracterizada pelo clima Aw, tropical úmido e seco com estação chuvosa bem definida no verão e estação seca durante o inverno, segundo a classificação de Köppen (1931). Apresenta índice pluviométrico entre 1300 -1900 mm ano⁻¹ e temperatura média anual em torno de 21°C. Os dados meteorológicos do período avaliado foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação meteorológica situada no Município de Posse, Goiás, localizado a 20 km das áreas experimentais. Os índices pluviométricos durante o período experimental estão representados na figura 1. Em nenhum dos experimentos foi utilizada irrigação. Os experimentos foram conduzidos sobre Latossolo Vermelho amarelo (EMBRAPA, 2006) com textura franco arenosa e relevo suavemente ondulado.

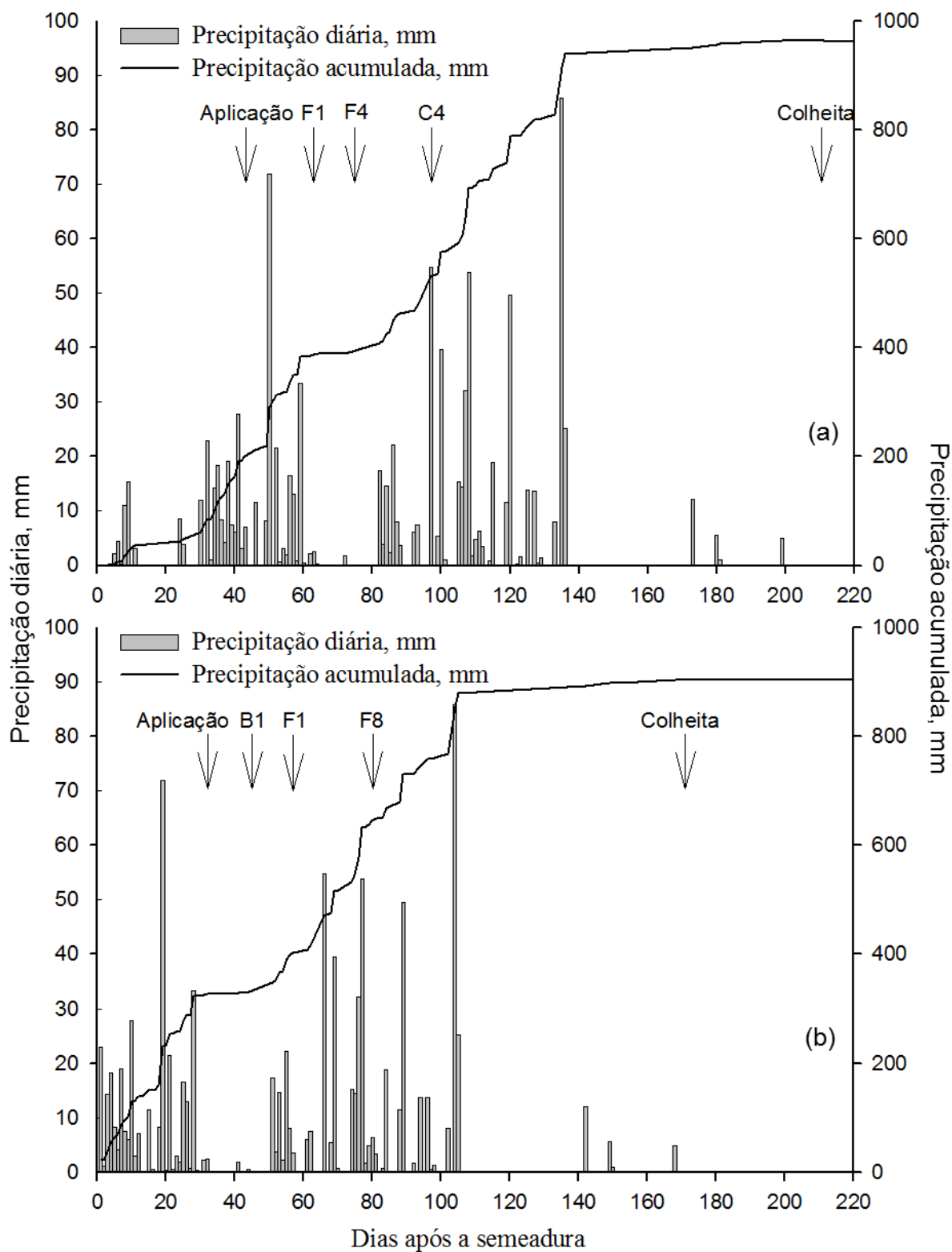


Figura 1 - Precipitações diárias e acumuladas ocorridas durante o ciclo da cultura do algodoeiro para área 1 (a) e área 2 e 3 (b) em Correntina, Bahia, na safra agrícola de 2012/2013.

Fonte: INMET.

4.3.2 Instalação do experimento

As áreas onde foram instalados os experimentos começaram a ser exploradas há 25 anos, por meio da bovinocultura de corte extensiva, e foi subsolada em 2010, para o cultivo da soja e algodão. Os experimentos foram conduzidos durante o ano agrícola 2012/2013 com a cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) em três áreas. As cultivares utilizadas foram a FM 975WS (Bayer CropScience) na área 1 e a DP555 (Deltapine) nas áreas 2 e 3. A sementeira ocorreu no dia 6 de dezembro de 2012 na área 1 e 6 de janeiro de 2013 nas áreas 2 e 3, pelo método de sementeira convencional, com espaçamento de 0,76 m entre linhas, atingindo uma média de oito (área 1) e doze (área 2 e 3) sementes por metro linear (Tabela 1).

Salienta-se que, devido às condições climáticas não favoráveis, as três áreas não foram conduzidas na mesma época de sementeira. Inicialmente, a sementeira ocorreu com intervalo de três dias entre a área 1 e as áreas 2 e 3. No entanto, após a sementeira nas duas últimas áreas, ocorreu uma precipitação de alta intensidade, provocando um selamento superficial que impediu a emergência das plantas, exigindo, assim, uma nova sementeira. Porém, logo após esta precipitação, ocorreu uma estiagem, atrasando a nova sementeira em 12 dias. A figura 2 ilustra a localização das três áreas.

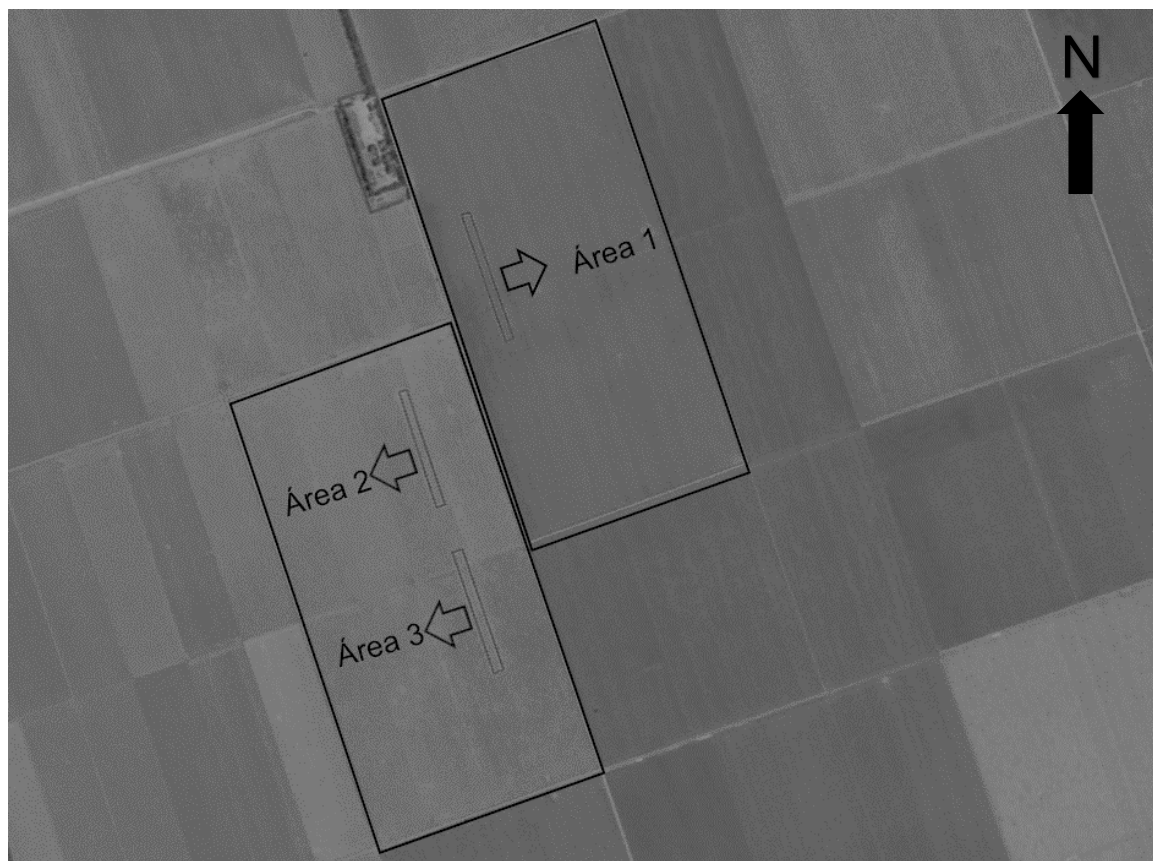


Figura 2 - Localização dos três experimentos em Correntina, Bahia.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 1 - Características dos experimentos conduzidos nas áreas experimentais.

Características	Local		
	Área 1	Área 2	Área 3
Coordenadas	S 13°47'26"	S 213°47'44"	S 13°48'10"
	W 46° 1'22"	W 46° 1'30"	W 46° 1'19"
Altitude (m)	920	920	920
Cultura antecessora	Soja	Soja	Soja
Semeadura	06/12/12	06/01/13	06/01/13
Cultivar	FM 975WS	DP555	DP555
Espaçamento (m)	0,76	0,76	0,76
População de plantas	105.000	158.000	158.000
Fertilização fosfatada (kg ha ⁻¹)	130	130	130
Fertilização potássica (kg ha ⁻¹)	120	120	120

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

A fertilização de semeadura foi realizada de acordo com a análise de solo realizada anteriormente à implantação do experimento (Tabela 2), sendo aplicado o correspondente a 250 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado (11-52-00) (N-P-K) em todas as áreas, o que corresponde a 27 kg ha⁻¹ de N e 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Posteriormente, foi realizada adubação à lanço em superfície com 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl), o que corresponde a 120 kg ha⁻¹ de K₂O.

Durante o desenvolvimento da cultura, para as três áreas experimentais, as práticas de manejo e os tratos culturais foram os mesmos e seguiram as recomendações de Freire (2007).

Tabela 2 - Média dos atributos químicos avaliados quando da implantação dos experimentos na profundidade de 0-0,15m (Correntina, Bahia, 2013).

Área	pH _{H2O}	Al ⁽¹⁾	Ca ⁽²⁾	Mg ⁽³⁾	K ⁽⁴⁾	CTC _{pH 7,0}	P	V% ⁽⁵⁾	m% ⁽⁶⁾	Argila	MOS ⁽⁷⁾
		*****cmo _c dm ⁻³ *****				mg dm ⁻³		***** % *****		*****g kg ⁻¹ *****	
1	5,7	0	4,6	0,8	0,041	7	97,5	77,8	0	190	10
2	6,0	0	2,7	0,5	0,051	4,7	33,4	69,6	0	230	8
3	6,3	0	2,6	0,4	0,061	4,5	25,8	68,2	0	240	9

(1)Alumínio. (2) Cálcio-³. (3)Magnésio. (4)Potássio. (5)Saturação por Bases. (6)Saturação por alumínio. (7)Matéria orgânica do solo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.3.3 Delineamento experimental, determinações realizadas e parâmetros avaliados

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com sete tratamentos e três repetições nas três áreas experimentais. Cada parcela experimental possuía dimensões de 27 m x 27 m, totalizando 729 m². As leituras foram realizadas no interior de cada parcela, e o conjunto (trator + sensor) utilizado para realizar as leituras de IV possuía uma faixa de escaneamento de 17 m de largura (Figura 3).

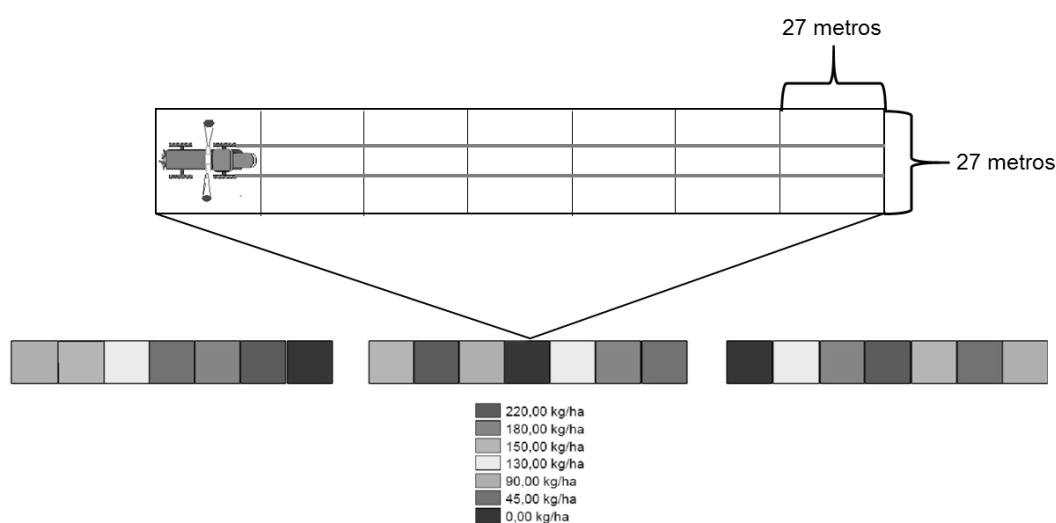


Figura 3 - Croqui da área experimental e ilustração do escaneamento realizado pelo sensor.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os tratamentos consistiram em doses de 0, 45, 90, 130, 150, 180 e 220 kg ha⁻¹ de N, aplicadas à lanço, utilizando como fonte o fertilizante ureia (46-00-00). A adubação em cobertura foi realizada aos 43 DAS na área 1 e aos 32 DAS na área 2 e área 3. A diferença entre os dias de aplicações entre as áreas deve-se às condições climáticas não terem sido favoráveis para a aplicação do fertilizante no período de 32 DAS na área 1. As doses utilizadas tinham como intuito estabelecer a curva de resposta a N em função da produtividade para a cultura do algodoeiro e avaliar a eficiência do sensor óptico em diferentes estádios fenológicos. As doses foram sugeridas conforme o manejo adotado pelo produtor e a recomendação foi encontrada na literatura específica da área. Como o objetivo principal do trabalho foi avaliar o desempenho do sensor na cultura do algodoeiro, as doses de N não foram parceladas, sendo aplicadas na fase inicial da cultura. De acordo com Schröder et al. (2000), parcelas ricas em N são um pré-requisito para serem utilizadas como referência para a realização de diagnose, corrigindo, assim, efeitos de coloração na cultura que não são causados por N. Entretanto, recomenda-se que a adubação nitrogenada em cobertura seja realizada, no máximo, até 55-60 DAE, parcelada em duas aplicações, sendo primeira realizada por ocasião do aparecimento dos primeiros botões florais, na fase B1 (25-30 dias após a emergência - DAE) e a segunda no início do florescimento, na fase F1 (50-60 DAE) (MAPA, 2006).

As leituras de IV foram realizadas em três épocas de avaliação. As datas de avaliação, DAS e estágio fenológico da cultura estão descritas na tabela 3. O estágio fenológico foi determinado através da escala da Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) proposta por Marur e Ruano (2001), na qual o estágio B1 corresponde à formação do primeiro botão floral no primeiro ramo reprodutivo, o estágio F1 corresponde à abertura da primeira flor no primeiro ramo reprodutivo e o estágio C1 corresponde à formação do primeiro capulho no primeiro ramo reprodutivo.

Tabela 3 - Data das três avaliações, dias após a semeadura e estágio fenológico em que se encontrava a cultura do algodoeiro em cada área experimental (Correntina, Bahia, 2013).

	*****Área 1 *****			*****Área 2 *****			*****Área 3 *****		
	Data	DAS	Estádio	Data	DAS	Estádio	Data	DAS	Estádio
Aplicação de N	18/01/2012	43	B1	07/02/2013	32	V4	07/02/2013	32	V4
1ª Avaliação	07/02/2013	63	F1	19/02/2013	45	B1	19/02/2013	45	B1
2ª Avaliação	19/02/2013	75	F4	12/03/2013	57	F1	12/03/2013	57	F1
3ª Avaliação	12/03/2013	97	C4	04/04/2013	80	F8	04/04/2013	80	F8

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

No momento de cada uma das três leituras de IV, foram realizadas coletas de plantas para determinação da MS e N absorvido e medição da altura de planta. Essas avaliações foram determinadas no centro de cada parcela (adjacente ao ponto de leitura de IV).

As leituras de IV foram realizadas com o sensor óptico de reflectância vegetal denominado N-Sensor ALS® (YARA) acoplado ao distribuidor de fertilizante autopropelido Hércules 5.0® (STARA) (Figura 4). O N-sensor ALS® (Figura 5) é um sensor ativo (ALS= Active Light Source), que emite luz própria, compensando as interferências da luminosidade do ambiente, garantindo, assim, maior autonomia. O sensor é composto por duas unidades (cabeças) de medição e uma unidade processadora, montadas em uma armação metálica, a qual é fixada no veículo em que é instalado. Cada cabeça de medição (Figura 6) possui um transmissor que emite luz de xênon na frequência de 10 Hz, fornecendo luz multiespectral de 650 a 1100 nm de alta intensidade, e um detector com dois filtros de interferência e fotodiodos com comprimento de onda de 730 e 760 nm (JASPER; REUSCH; LINK, 2009).

Como o sensor não possui um algoritmo para aplicação de N no algodoeiro, apenas foram utilizados os valores de IV, descartando quaisquer recomendações de N realizada pelo equipamento neste experimento.



Figura 4 - Conjunto Hércules 5.0® + N-sensor® realizando as leituras nas parcelas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014); Yara (2009).

Para a determinação da produção de MS foram coletadas quatro fileiras de 2 m lineares no centro de cada parcela, por meio do corte de plantas na base do solo, as quais, posteriormente, foram secas em estufa de aeração forçada, a aproximadamente 65° C, até a obtenção de massa constante. Após essa etapa, as plantas foram moídas em um moedor de tecido vegetal. Foi retirada uma amostra para a determinação conteúdo de N, seguindo a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

A altura de planta foi determinada com a utilização de uma trena, com a qual foi realizada a medição da base do solo até o ápice de cada planta em cinco plantas por parcela.

4.3.4 Análises dos resultados

Os dados obtidos foram submetidos à análise descritiva e de variância (ANOVA) para revelar a existência de significância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o programa estatístico ASSISTAT (SILVA;

AZEVEDO, 2009). Para a análise de regressão entre os parâmetros avaliados, foi utilizado o programa Sigma Plot 11.

4.4 Resultados e discussão

4.4.1 Relações entre a dose de N aplicada e os parâmetros vegetativos do algodão

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas 4, 5 e 6, a aplicação das doses de N afetou significativamente os atributos vegetativos, tais como: MS; N absorvido e altura de plantas, apresentando ajuste quadrático entre os fatores e as doses de N. Rossato (2011) observou a máxima produção de biomassa do algodoeiro no tratamento que recebeu a maior dose aplicada, embora isso não tenha refletido em máxima produtividade, a qual foi atingida com uma dose intermediária de N. Em seu estudo, Rossato (2011) utilizou a dose máxima de 135 kg ha⁻¹ de N, diferentemente do presente estudo, em que a dose máxima chegou a 220 kg ha⁻¹ de N.

Tabela 4 - Coeficientes de determinação entre doses de N aplicadas e atributos vegetativos na área 1 (Correntina, Bahia, 2013).

Estádio	DAS	Equação	R ²
Matéria Seca, kg ha⁻¹			
Estádio F1	63	$y = 993,8699 + 11,0474x - 0,0179x^2$	0,74**
Estádio F4	75	$y = 2275,1738 + 19,2142x - 0,0179x^2$	0,66**
Estádio C4	97	$y = 4920,3214 + 6,9122x + 0,0535x^2$	0,80**
Teor de Nitrogênio, N%			
Estádio F1	63	$y = 2,5566 + 0,0063x - 0,000010184x^2$	0,41**
Estádio F4	75	$y = 2,0790 + 0,0101x - 0,000038450x^2$	0,29*
Estádio C4	97	$y = 2,2400 + 0,0068x - 0,0000295x^2$	0,39*
Nitrogênio Absorvido, kg ha⁻¹			
Estádio F1	63	$y = 25,8520 + 0,3593x - 0,0003x^2$	0,80**
Estádio F4	75	$y = 45,4744 + 0,8220x - 0,0018x^2$	0,52**
Estádio C4	97	$y = 108,0088 + 0,6913x - 0,0010x^2$	0,70**
Altura, m			
Estádio F1	63	$y = 45,4344 + 0,1183x - 0,000026281x^2$	0,90**
Estádio F4	75	$y = 62,0844 + 0,1612x + 0,0003x^2$	0,48**
Estádio C4	97	$y = 65,6435 + 0,1592x - 0,000048732x^2$	0,75**

^{ns} não significativo a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 5 - Coeficientes de determinação entre as doses de N aplicadas e os atributos vegetativos na área 2 (Correntina, Bahia, 2013).

Estádio	DAS	Equação	R ²
Matéria Seca, kg ha⁻¹			
Estádio B1	45	$y = 235,5447 - 0,6773x + 0,0074x^2$	0,61**
Estádio F1	57	$y = 1162,8307 + 7,6259x - 0,0149x^2$	0,47**
Estádio F8	80	$y = 2085,1895 + 8,8588x + 0,0023x^2$	0,66**
Teor de Nitrogênio, N %			
Estádio B1	45	$y = 2,7527 + 0,0021x - 0,0000013617x^2$	0,17ns
Estádio F1	57	$y = 2,7101 + 0,0101x - 0,000041997x^2$	0,34*
Estádio F8	80	$y = 2,7164 + 0,0033x - 0,000016257x^2$	0,10ns
Nitrogênio Absorvido, kg ha⁻¹			
Estádio B1	45	$y = 6,4119 - 0,0137x + 0,0002x^2$	0,60**
Estádio F1	57	$y = 31,1159 + 0,3714x - 0,0010x^2$	0,48**
Estádio F8	80	$y = 56,3242 + 0,3646x - 0,0006x^2$	0,59**
Altura, m			
Estádio B1	45	$y = 22,4692 + 0,0543x - 0,00002057x^2$	0,48**
Estádio F1	57	$y = 35,868 + 0,0749x - 0,000024494x^2$	0,83**
Estádio F8	80	$y = 67,6205 + 0,1330x - 0,0002x^2$	0,79**

ns não significativo a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 6 - Coeficientes de determinação entre as doses de N aplicadas e os atributos vegetativos na área 3 (Correntina, Bahia, 2013).

Estádio	DAS	Equação	R ²
Matéria Seca, kg ha⁻¹			
Estádio B1	45	$y = 304,3660 + 0,6405x - 0,0006x^2$	0,49**
Estádio F1	57	$y = 1334,1592 + 5,5925x + 0,0032x^2$	0,70**
Estádio F8	80	$y = 1971,8736 + 12,5042x - 0,0078x^2$	0,77**
Teor de Nitrogênio, N%			
Estádio B1	45	$y = 3,2222 - 0,0009x - 0,0000090121x^2$	0,14ns
Estádio F1	57	$y = 2,8818 + 0,0006x - 0,0000044216x^2$	0,0064ns
Estádio F8	80	$y = 2,7605 + 0,0020x - 0,0000063832x^2$	0,06ns
Nitrogênio Absorvido, kg ha⁻¹			
Estádio B1	45	$y = 9,8322 + 0,0174x - 0,000016031x^2$	0,57**
Estádio F1	57	$y = 38,9069 + 0,1667x - 0,00000875x^2$	0,69**
Estádio F8	80	$y = 54,8075 + 0,3784x - 0,0002x^2$	0,79**
Altura, m			
Estádio B1	45	$y = 24,4356 + 0,0801x - 0,000099560x^2$	0,72**
Estádio F1	57	$y = 40,1917 + 0,0597x + 0,0001x^2$	0,83**
Estádio F8	80	$y = 64,1094 + 0,1238x - 0,0001x^2$	0,84**

ns não significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na área 1, o maior coeficiente de determinação entre doses de N e MS foi encontrado na terceira avaliação, estágio C4 (97 DAS), com um valor de $R^2 = 0,80$ ($p < 0,01$) (Tabela 4). Nesse período, as plantas encontravam-se em estágio reprodutivo. O mesmo comportamento foi verificado nas áreas 2 e 3 (Tabelas 5 e 6, respectivamente), quando as plantas se encontravam no estágio F8 (80 DAS), apresentando valores de $R^2 = 0,66$ ($p < 0,01$) e $R^2 = 0,77$ ($p < 0,01$), respectivamente. Nesse mesmo período, as plantas estavam finalizando o estágio de florescimento e iniciando o estágio reprodutivo. Segundo Rosolem, Zancanaro e Tessaro (2007), esse comportamento é esperado, pois o algodoeiro encontra-se em crescimento vegetativo linear até o início da fase reprodutiva, quando irá gerar o maior número de posições frutíferas, definindo o potencial produtivo da cultura. Posteriormente, na finalização do estágio de florescimento, a resposta das plantas à adubação torna-se reduzida, portanto, correções de fertilização não são recomendadas a partir desse estágio.

Quanto à quantidade de N absorvido, também foi verificada resposta à aplicação de N nas três áreas avaliadas (Tabelas 4, 5 e 6). O maior coeficiente de

determinação encontrado na área 1 foi no estágio F1 (63 DAS), com valor de $R^2 = 0,80$ ($p < 0,01$), que correspondia ao início do florescimento. Para a área 2, o estágio B1 (45 DAS) apresentou maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,60$) ($p < 0,01$), diferentemente da área 3, onde foi encontrado o maior R^2 no estágio F8 (0,79) ($p < 0,01$) (80 DAS). Salienta-se que as maiores respostas à adubação nitrogenada ocorrem no início do florescimento do algodoeiro quando haverá a maior exigência de N pela cultura.

Diferentemente da produção de MS e da quantidade de N absorvido, houve pequena relação entre o teor de N foliar e as doses de N aplicadas. Na área 1, apenas foi verificado ajuste a nível de 5% de probabilidade no estágio F1 (Tabela 4). Para a área 2 (Tabela 5), apenas foi verificado relação significativa entre as doses de N e o teor de N foliar aos 57 DAS. Já para a área 3 (Tabela 6), não foi verificado relação significativa entre o teor de N e os tratamentos em nenhum dos períodos avaliados.

A altura de planta apresentou elevadas correlações com a dose de N aplicada. Pontua-se que resultados semelhantes foram anteriormente reportados por Motomyia et al. (2012). Esse comportamento deve-se ao fato de que o N é constituinte de muitos componentes da célula vegetal. Se a deficiência por N desenvolve-se gradualmente, os caules tornam-se delgados e comumente lenhosos, devido ao acúmulo excessivo de carboidratos que não podem ser utilizados na síntese de aminoácidos e outros compostos nitrogenados (TAIZ; ZEIGER, 2004). Neste estudo, a grande amplitude das doses de N provavelmente causaram diferenças no desenvolvimento do caule do algodoeiro e, conseqüentemente, provocaram variação na altura de planta. Na área 1, o maior coeficiente de determinação alcançado foi encontrado no estágio F1 (63 DAS), com valores de $R^2 = 0,90$ ($p < 0,01$) (Tabela 4). A mesma resposta foi obtido na área 2, com valor de $R^2 = 0,83$ ($p < 0,01$) (Tabela 5), e na área 3, com valor de $R^2 = 0,84$ ($p < 0,01$), onde as plantas também se encontravam no estágio F1 (Tabela 6). Esses resultados corroboram aos obtidos por Raper (2011), autor que observou alta resposta entre altura de planta e dose de N aplicada, principalmente nos estádios próximos ao florescimento e no florescimento pleno.

4.4.2 Relações entre a dose de N fertilizante aplicada e o índice de vegetação obtido pelo sensor óptico

A avaliação do estado nutricional das culturas, feita com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, é suportada por diversos estudos que relataram a eficiência dos sensores óticos em distinguir, através da reflectância do dossel vegetativo, o estado nutricional induzido por diferentes doses de N (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; THOMAS; GAUSMAN, 1977).

Neste estudo, a eficiência do sensor foi justificada pelos elevados coeficientes de determinação entre as doses de N aplicadas e o IV da cultura nas três áreas avaliadas (Figura 5).

Para a área 1, nas três avaliações realizadas, houve ajuste quadrático entre o IV e as doses de N, sendo os maiores valores observados na segunda e na terceira avaliação ($R^2 = 0,97$; $p < 0,01$ e $R^2 = 0,97$; $p < 0,001$, respectivamente), que correspondem aos estádios F4 (75 DAS) e C4 (97 DAS), os quais compreendem do período de florescimento até o estágio reprodutivo (Figura 5a). Nas áreas 2 e 3 (Figuras 5b e 5c, respectivamente), os coeficientes de determinação ($R^2 = 0,65$; $p < 0,01$ e $R^2 = 0,89$; $p < 0,01$, respectivamente) foram menores na primeira avaliação. Embora tenha sido encontrado um comportamento linear, foi verificada baixa variação do IV para as diferentes doses de N. Este comportamento pode estar associado ao período de leitura, o qual foi realizado 13 dias após a fertilização nitrogenada, sendo previsível a indiferença entre os tratamentos, pois o N aplicado ainda não havia sido totalmente absorvido e tampouco metabolizado pelas plantas. Esses resultados são condizentes com as afirmações de Epiphanyo et al. (1996), os quais observaram que, à medida que a cultura se desenvolve, a média dos IVs aumenta e a variância diminui, fazendo com que o coeficiente de variação seja cada vez menor. Na área 2, a terceira avaliação (estádio F8) apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,85$; $p < 0,05$) (Figura 5b). Já para área 3 o maior coeficiente foi encontrado na segunda avaliação (estádio F1), com $R^2 = 0,98$ ($p < 0,01$) (Figura 5c).

Os resultados verificados neste estudo corroboram os encontrados por Motomyia et al. (2012), Rossato (2011) e Fridgen e Varco (2004), autores que observaram que as doses de N aplicadas afetaram significativamente as leituras de

índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), confirmando a eficiência do sensor em diferenciar as alterações das doses de N expressas pela planta.

A capacidade dos sensores ópticos de distinguir o estado nutricional de plantas submetidas a doses de N foi reportado por Solari et al. (2008) em relação ao milho, por Povh et al. (2008) em relação a cereais, por Fridgen e Varco (2004) e Motomyia et al. (2012) em relação ao algodão e por Rossato (2011) em relação à cana-de-açúcar.

Nas três áreas avaliadas, principalmente no que diz respeito à terceira avaliação, foi possível observar que, a partir da dose de 150 kg ha^{-1} , há uma tendência de estabilização das leituras de IV, demonstrando um ponto de saturação espectral associado ao consumo de luxo das plantas, resultado da alta concentração de N na planta (ARGENTA et al., 2002) (Figura 5). Esse efeito de saturação de N pelas plantas em elevadas doses de N foi verificado anteriormente por Blackmer e Schepers (1994)..

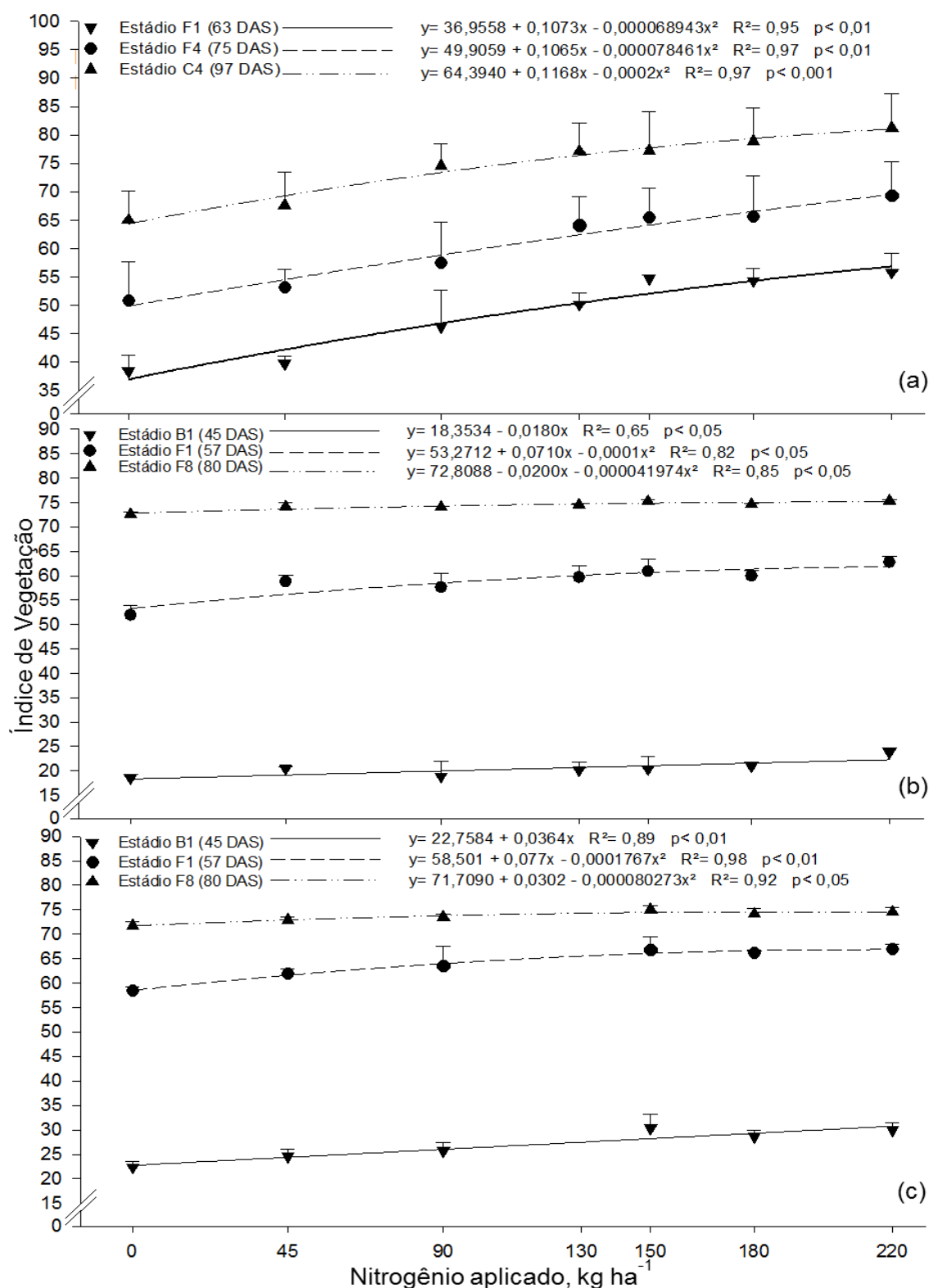


Figura 5 - Relação entre as doses de N aplicadas e o IV em três estádios da cultura do algodoeiro. Primeira avaliação (45 DAS); segunda avaliação (57 DAS); terceira avaliação (80 DAS) para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

4.4.3 Relações entre os atributos vegetativos e o índice de vegetação obtido pelo sensor óptico

A nutrição nitrogenada do algodoeiro afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, efeito esse pronunciado em diversos atributos vegetativos, como teor de N nas plantas, altura de planta e produção de MS, entre outros. Esses atributos em conjunto podem ser estimados por meio de sensores, resultando em IVs. A capacidade dos sensores ópticos de estimar os atributos vegetativos das culturas por meio do IV é reportada em diversos trabalhos referentes a culturas como o algodão (MOTOMYIA et al. 2012; FRIDGEN; VARCO, 2004), milho (BRAGAGNOLO et al., 2013) e cana-de-açúcar (PORTZ et al., 2012). Em todos estes trabalhos anteriormente citados, os autores também encontraram elevadas relações entre a produção de MS e a quantidade de N absorvido.

Conforme apresentado na figura 6, o sensor foi eficiente em avaliar a produção de MS nas três áreas avaliadas. Na área 1 (Figura 6a), houve ajuste quadrático significativo na primeira e segunda época de avaliação entre o IV e a MS nos estádios F1 (63 DAS) e F4 (75 DAS). O coeficiente de determinação obtido foi o mesmo nas duas avaliações ($R^2 = 0,64$; $p < 0,001$). Na terceira avaliação referente ao estádio C4 (97 DAS), as plantas já se encontravam em estádio reprodutivo, obtendo, assim, um menor coeficiente de determinação, apesar de ter sido verificado um ajuste linear entre os fatores ($R^2 = 0,57$, $p < 0,001$).

Com referência às áreas 2 e 3 (Figura 6b e 86c, respectivamente), a primeira avaliação realizada apresentou os menores coeficientes de determinação com valores de R^2 de 0,45 ($p < 0,01$) e 0,44 ($p < 0,01$), respectivamente. Esse resultado ocorreu devido ao fato de as plantas encontrarem-se em estádio B1 (aparecimento do primeiro botão floral), ou seja, em um estádio inicial de desenvolvimento da cultura, apresentando baixo conteúdo de biomassa e reduzida cobertura do solo, afetando negativamente as medidas de reflectância vegetal do sensor óptico (PORTZ, 2012; MOLIN, 2010). Além disso, a primeira avaliação foi realizada 13 dias após a aplicação dos tratamentos, havendo pouco tempo hábil para que as plantas respondessem ao fertilizante. Verificou-se que a maior relação entre MS e IV na área 2 foi nos estádios F1 e F8 com valores de R^2 de 0,56 ($p < 0,01$) e 0,57 ($p < 0,01$) (Figura 6b). Para a área 3, o estádio F1 apresentou o maior coeficiente de determinação, com valor de R^2

de 0,66 ($p < 0,001$) (Figura 6c). Em estudos conduzidos por Bronson et al. (2003) utilizando espectrorradiômetro portátil, os autores obtiveram forte relação entre o NDVI com MS e o conteúdo de N nas plantas nos estádios B1 (formações de botões florais), F1 (início de florescimento) e durante o pico de florescimento. Os estádios de término da formação do botão floral e início de florescimento são reportados por diversos autores como os estádios no quais os sensores ópticos possuem maior sensibilidade na geração do IV (MOTOMYIA et al., 2012). Sendo assim, os resultados obtidos no presente estudo corroboram os encontrados nos trabalhos anteriormente realizados sobre o mesmo tema.

De maneira semelhante aos demais atributos vegetativos, a MS apresentou maiores relações com o IV durante o estágio F1 para as três áreas avaliadas, reiterando a eficiência do sensor durante este estágio vegetativo.

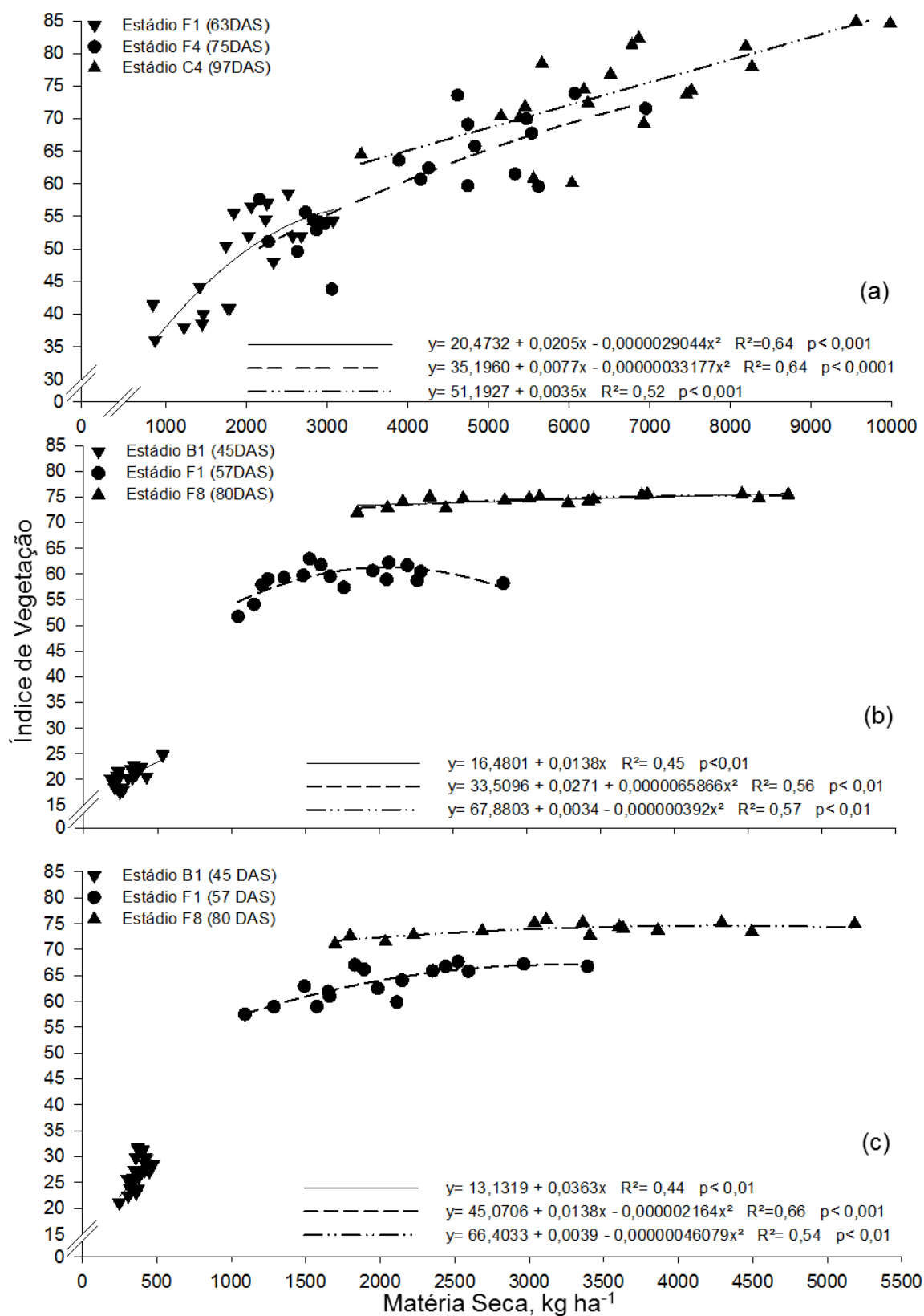


Figura 6 - Relação entre a MS e o IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

A relação entre a quantidade de N absorvido e o IV, para a área 1, está representada na figura 7a. Neste caso, o sensor foi capaz de detectar a variabilidade da quantidade de N absorvido independentemente da época avaliada. Foi observado um ajuste quadrático nos estádios F1 (63 DAS) e F4 (75 DAS) e um ajuste linear na terceira avaliação para o estádio C4 (97 DAS). O maior coeficiente de determinação foi obtido na segunda avaliação para o estádio F1, apresentando um valor de $R^2 = 0,73$ ($p < 0,0001$). Em relação à área 2, foram verificados resultados semelhantes aos obtidos para a área 1, sendo observado na primeira avaliação, para o estádio B1 (45 DAS), um ajuste linear entre o N absorvido e o IV (Figura 7b) com R^2 de 0,43 ($p < 0,01$). Na segunda e terceira avaliação houve ajuste quadrático com um R^2 de 0,6 para ambas as avaliações. O diagnóstico da quantidade de N absorvido deve ser realizado precocemente, permitindo a correção do *déficit* de N por meio da fertilização, de modo que a produtividade não seja severamente comprometida.

Diferentemente das áreas 1 e 2, a área 3 apresentou ajuste linear na primeira e segunda avaliação e ajuste quadrático na terceira avaliação (Figura 7c), sendo que o maior R^2 foi encontrado para a primeira avaliação ($R^2 = 0,58$) ($p < 0,001$). A relação entre o sensor óptico e a quantidade de N absorvido é marcadamente influenciada pelo estádio fenológico da cultura (PORTZ et al. 2012), havendo um mínimo de biomassa e de quantidade de N absorvido no qual o sensor apresenta eficiência e um valor máximo, sendo possível verificar a saturação (PORTZ et al. 2012). O mesmo comportamento foi encontrado por Bragagnolo et al. (2013) na cultura do milho; os autores observaram que, em estádios avançados da cultura, há uma saturação nas leituras de IV. Resultados semelhantes foram encontrados, ainda, por Fridgen e Varco (2004), que consideraram o início e o pico de florescimento do algodoeiro como a melhor época para estimar o N absorvido no algodoeiro com o uso de sensores ópticos. Segundo Rosolem, Zancanaro e Tessaro (2007), nesse período ocorre a maior absorção de N na cultura. Neste estudo, os coeficientes de determinação mais elevados para as áreas 1, 2 e 3 ($R^2 = 0,73$, $R^2 = 0,43$ e $R^2 = 0,58$, respectivamente) foram observados durante o estádio de floração do algodoeiro, sendo estes valores satisfatórios e concordantes com os demais estudos realizados.

Trabalhos realizados anteriormente por Fridgen e Varco (2004) demonstraram que a utilização da reflectância vegetal por meio do uso de sensores ópticos pode ser uma ferramenta rápida e viável para estimar o estado nitrogenado nas plantas de algodoeiro, aumentando a eficiência na gestão do N. Em estudos conduzidos por Zhao

et al. (2005), os autores concluíram, a partir das relações de reflectância das plantas do algodoeiro, que o sensor não só tem o potencial para monitorar o N em tempo real, mas também pode servir como base para manejo da fertilização nitrogenada.

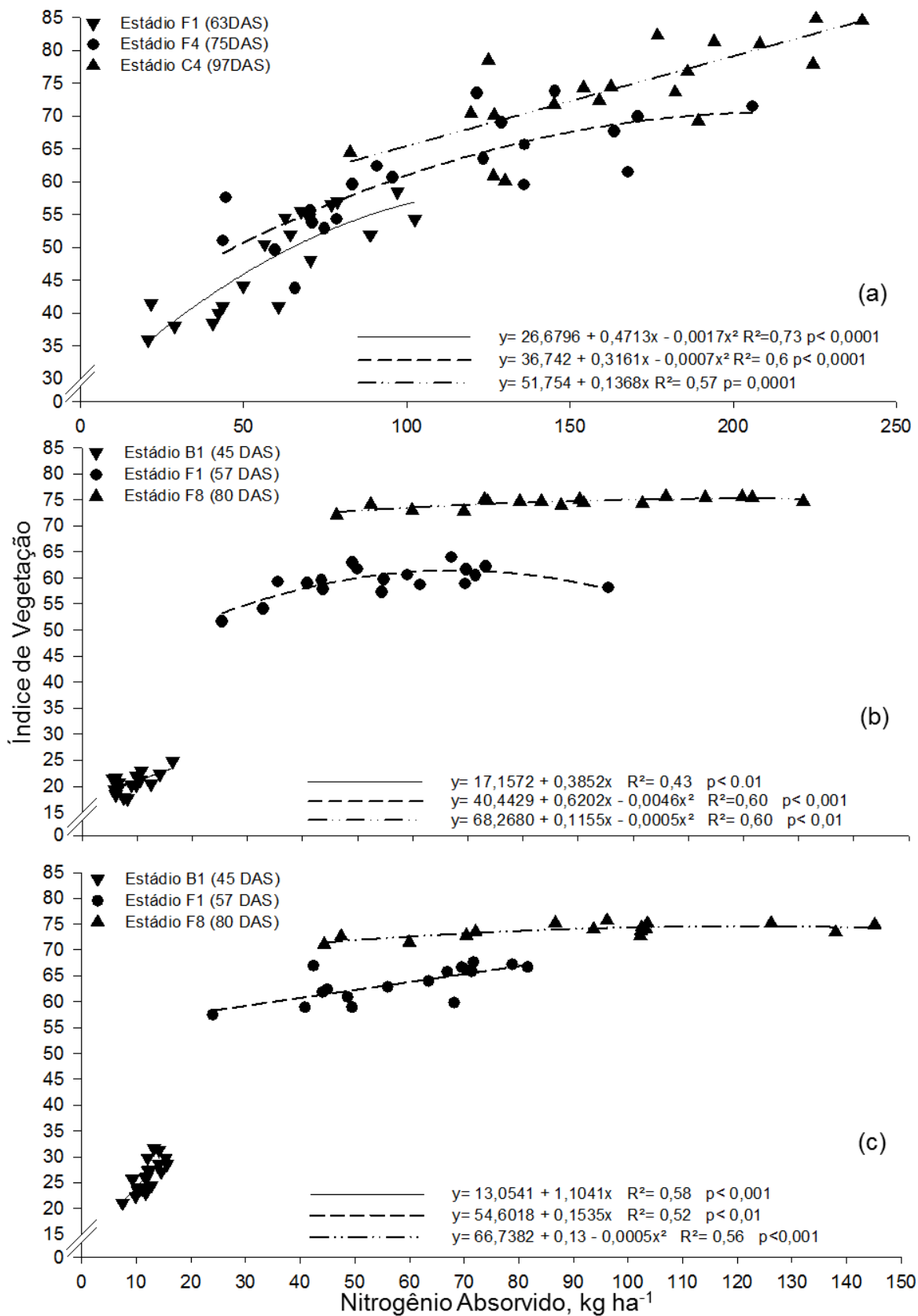


Figura 7 - Relação entre o N absorvido e IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Quanto à relação entre o IV e o teor de N nas plantas, houve relação significativa na primeira e na segunda época de avaliação (estádios F1 e F4) para a área 1 (Figura 8a), com valores de R^2 de 0,43 ($p < 0,01$) e 0,24 ($p < 0,05$), respectivamente, não sendo verificada relação significativa na terceira avaliação. Na área 2 (Figura 8b), houve ajuste significativo apenas no estágio F1 ($R^2 = 0,32$; $p < 0,01$), diferentemente da área 3 (Figura 8c), em que o ajuste significativo entre o teor de N na planta e o IV ocorreu ainda no estágio B1, com valor de $R^2 = 0,35$ ($p < 0,05$). De maneira geral, as relações entre o teor de N na planta e as leituras de IV foram baixas e apenas ocorreram nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura. Os resultados obtidos vão ao encontro dos encontrados por Malavolta et al. (2004) e Reis et al. (2006), os quais observaram que apenas as leituras do índice de clorofila aos 65 DAE apresentaram relação linear altamente significativa com os teores foliares de N no algodoeiro.

As baixas correlações entre o IV fornecido pelo sensor óptico e os teores de N, provavelmente, estão associadas ao efeito de diluição, já que a concentração dos nutrientes é diluída nos estádios de desenvolvimento mais avançados, uma vez que o N não incorporado às moléculas de clorofila não altera as propriedades de refletância da cultura (BLACKMER; SCHEPERS, 1994). Estudos realizados por Fridgen e Varco (2004) demonstraram que a utilização do IV pode não ser um bom indicador de teor de N na planta. No entanto, o sensor foi um bom indicador de biomassa, a qual está diretamente relacionada à quantidade total de N nas plantas. A baixa relação entre o IV e o teor de N nas plantas também foi verificada por Bragagnolo et al. (2013) no milho, principalmente em estádios avançados da cultura.

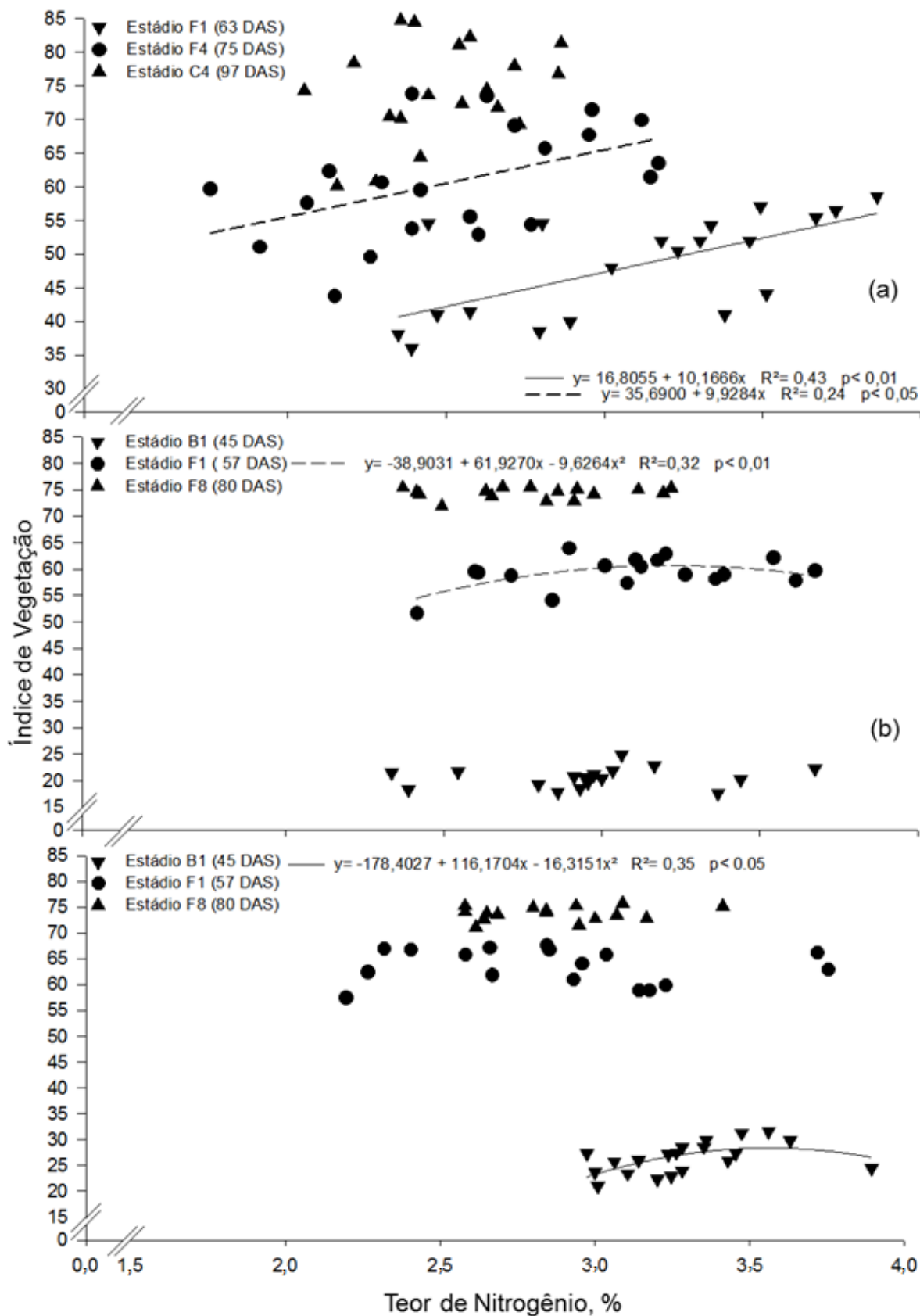


Figura 8 - Relação entre o teor de N e IV nas plantas em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

De maneira geral, o IV apresentou fortes relações com a altura de planta (Figuras 9a, 9b e 9c). De acordo como Malavolta et al. (2004), a altura das plantas do algodoeiro tem se mostrado um bom indicador nutricional da cultura e, muitas vezes, está diretamente relacionada com as doses de N aplicadas.

Na área 1 (Figura 9a), em todos os estádios avaliados, houve relação significativa entre IV e altura de planta, sendo que o menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,57$; $p < 0,0001$) foi encontrado no estádio F4 (75 DAS) e o maior valor ($R^2 = 0,78$; $p < 0,0001$) foi verificado no estádio C4 (97 DAS), no qual se obteve ajuste linear entre as variáveis. Na área 2 (Figura 9b), o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,62$; $p < 0,001$) foi observado no estádio F1 (57 DAS). O mesmo comportamento foi verificado para a área 3 (Figura 9c), na qual o estádio F1 apresentou novamente o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,78$; $p < 0,0001$). Esses resultados fortalecem os encontrados por Raper (2011), cujo estudo verificou elevadas relações entre a altura de plantas e o IV no início do florescimento e no pico de florescimento do algodoeiro.

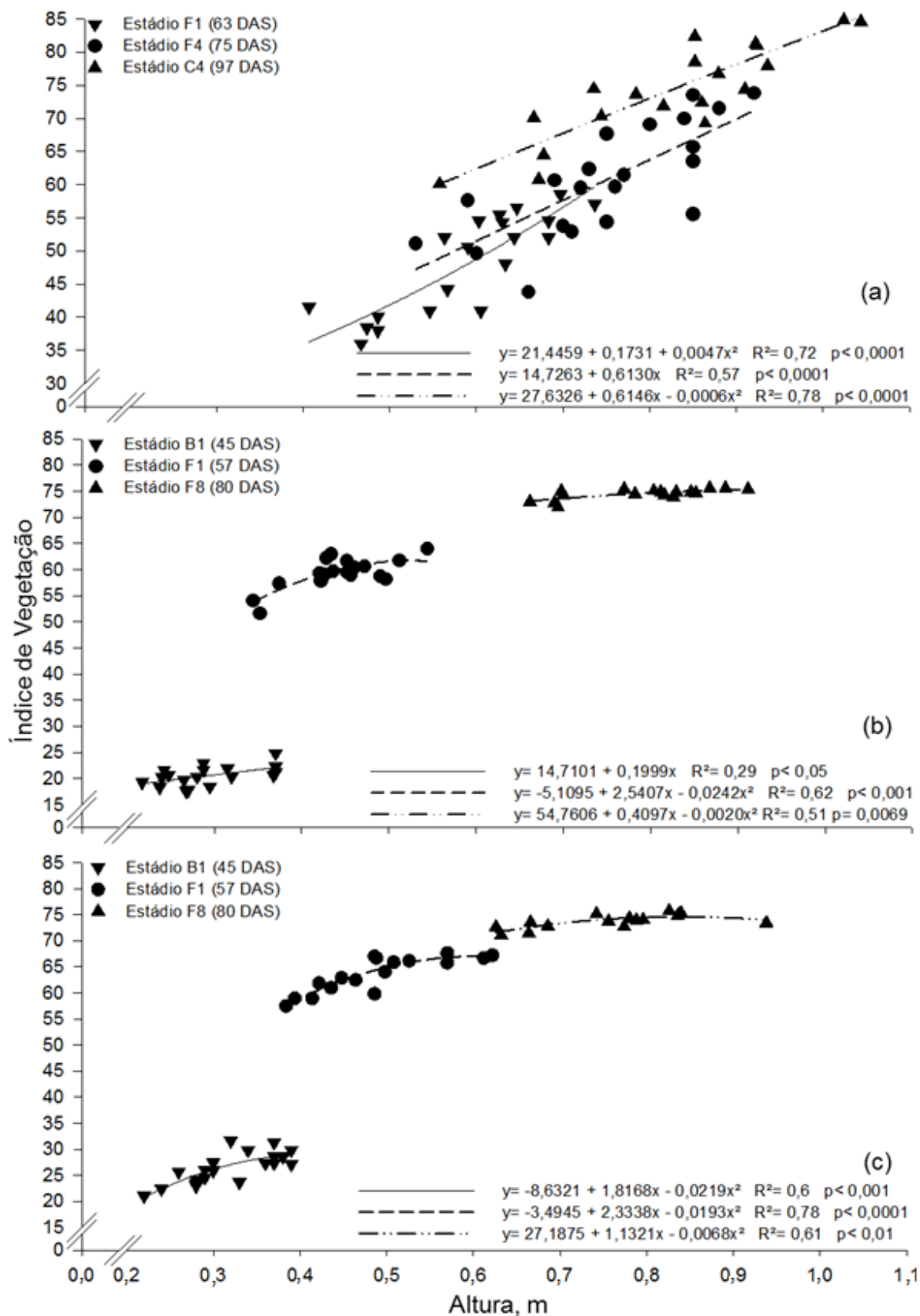


Figura 9 - Relação entre a altura de plantas e IV em cada estágio de avaliação para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

De maneira geral, o sensor mostrou-se mais efetivo nos estádios de desenvolvimento correspondentes ao período de florescimento da cultura do algodoeiro. As relações mais evidentes entre as leituras do sensor e os atributos vegetativos foram identificadas durante o estágio F1, correspondente ao início do florescimento. O uso do sensor durante este estágio permite que intervenções, no que diz respeito à fertilização, ainda possam ser realizadas para corrigir alguma deficiência nutricional apresentada pela cultura.

4.5 Conclusões

As doses de N aplicadas influenciaram positivamente os atributos vegetativos avaliados, especialmente a produção de MS, a quantidade de N absorvido e altura de plantas.

A leitura do IV obtida através do sensor óptico apresentou elevada correlação com a produção de MS, a quantidade de N absorvido e a altura de plantas. Por outro lado, apresentou baixa relação com o teor de N.

Embora a eficiência do sensor em diagnosticar o estado nutricional da cultura tenha aumentado com o transcorrer do ciclo da cultura, o estágio F1 foi o que apresentou maior potencial de uso do sensor considerando a prescrição de fertilização nitrogenada.

4.6 Literatura citada

ABRAPA: Associação Brasileira de Produtores de Algodão. **Área, produção e produtividade do Brasil**. Brasília. 2012. Disponível em: <<http://www.abrapa.com.br/estatisticas/Paginas/area-producao-productividade-brasil.aspx>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 601-612, 2003.

ARGENTA, G. et al. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropec. Brasileira**. Brasília, v. 37, n. 4, Apr. 2002.

ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo Monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 109-119, 2003.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiemts. **Soil & Tillage Research**, Amsterdan, v. 91, n. 5, p. 217-226, 2006.

BERNTSEN, J. et al. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, p. 65-83, 2006.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 25, p. 1791-1800, 1994.

BRAGAGNOLO, J. et al. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilizaton in corn: I. Plant nutritien and dry matter production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1288-1298, 2013.

BRONSON, K. F. et al. In-season nitrogen status sensing in irrigated cotton: II. Leaf nitrogen and biomass. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1439-1448, 2003.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão, 2007. p. 581-647.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 2006. 400 p

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação na cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 445-454, 1996.

FRASSON, F. R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

FREEMAN, K. W. et al. Late-season prediction of wheat grain yield and grain protein. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 34, p. 1837-1852, 2003.

FREIRE, E. C. **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: Embrapa Algodão (Associação Brasileira dos Produtores de Algodão). 2007. Disponível em: <<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/busca?b=ad&id=691360&biblioteca=vazio&busca=aLGOD%C3%83O&qFacets=aLGOD%C3%83O&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

FRIDGEN, J. L.; VARCO J. J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 63-69, 2004.

GERIK, T. J et al. Plant nitrogen status and boll load of cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 514-518, 1994.

GROHS, D. S. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 101-112, 2009.

JACKSON B. S.; GERIK T. J. Boll Shedding and Boll Load in Nitrogen-Stressed Cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, n. 3, p. 483-488, 1990.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination—impact of seed rate, variety and growth stage. In: VAN HENTEN, E. J.; GOENSE, D.; LOKHORST, C. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 7., 2009, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands: 7th European conference on precision agriculture. Academic Publishers, 2009. p. 23–30.

JENKINSON, D.S.; AYANABA, A. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, p.912-915, 1977.

JØRGENSEN, J. R.; JØRGENSEN, R. N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.8, p.63–73, 2007.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388 p.

LINK, A.; JASPER, J.; REUSCH, S. Suitability of different crop parameters for the determination of site-specific nitrogen fertilizer demand. In: STAFFORD, J. V. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 5., 2005, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands: 5th European Conference on Precision Agriculture. Academic Publishers, 2005. p. 297-302.

MALAVOLTA, E. et al. Evaluation of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 35, p. 1007-1019, 2004.

MALIK, M. N. A.; EVENSON, J. P.; EDWARDS, D. G. The effect of level of of nitrogen nutrition on carliness in upland cotton (*Gossypium hirstum* L.). **Australian Journal of Agricultural Research**, New Zeland, v. 29, p. 1213-1221. 1978.

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manejo da adubação Nitrogenada do algodoeiro no Sistema plantio direto com Integração lavoura-pecuária, no Cerrado de Goiás**. Circular Técnico, n. 199, Campina Grande, 2006.

MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 313-317, 2001.

MAYFIELD, A. H.; TRENGOVE, S. P. Grain and protein responses in wheat using the N-Sensor for variable rate application. **Crop Past Science**, Madison, v. 60, p. 818-823, 2009.

MELCHIORI, R. et al. Avances em la utilización de sensores remotes para manejo de nitrógeno de maíz. In: NATIONAL CONGRESSO OF AAPRESID, 14., 2005, Santa Fé. **Proceedings**...Santa Fé, 2005. p. 155-160.

MINOLTA, C. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22 p.

MISTELE, B.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2004, Minneapolis. **Proceedings**... Minneapolis, 2004.

MOLIN, J. P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 1345-1349, 2010.

MOTOMYIA, V. et al. Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1159-1165, 2012.

PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, p. 33-44, 2012.

POVH, F. P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1075-1083, 2008.

RAMBO, L. et al. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1279-1287, 2004.

RAPER, B. T. **Effectiveness of crop reflectance sensors on detection of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth and nitrogen status**. 2007. 288 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Agronomia) –Faculty of Mississippi State University, Mississippi, 2011.

REDDY, V. S. et al. KIC, a novel Ca²⁺ binding protein with one EF-hand motif, interacts with a microtubule motor protein and regulates trichome morphogenesis. **Plant Cell**, Florida, v. 16, p. 185-200, 2004.

REIS, A. R. et al. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, São Paulo, v. 65, p. 163-171, 2006.

REUSCH, S. Optimisation of oblique-view remote measurement of crop Nuptake under changing irradiance conditions. In: STAFFORD, J.; WERNER, E. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 4., 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin, The Netherlands: 4th European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, 2003. p. 573-578.

ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L. Z.; TESSARO, L. C. Nitrogênio e enxofre na cultura do algodoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, 2007. p. 321-347.

ROSSATO, O. B. **Metodologias de avaliação e aplicação de nutrientes nas culturas de cana-de-açúcar e algodão**. 2011. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011.

SCHMIDHALTER, U. et al. Field-scale validation of a tractor based multispectral crop scanner to determine biomass and nitrogen uptake of winter wheat. In: STAFFORD, J.; WERNER, E. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 4., 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin, The Netherlands: 4th European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, 2003. p. 615- 619.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 66, p. 151-164, 2000.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Principal components analysis in the software assistat-statistical assistance. In: **WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE**, 7., 2009, San Jose. **Proceedings...** San Jose: St. Joseph: ASABE, 2009. 5 CD-ROM.

SINGH, J. et al.. The role of inhibitors in the bioavailability and mitigation of nitrogen losses in grassland ecosystems. In: NAIDU, R. (Ed). **Chemical Bioavailability in Terrestrial Environment**. 2006.

SOLARI, F. J. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 571-579, 2008.

SOLIE, J. B. et al. Real-time sensing and N fertilization with a field scale GreenSeeker applicator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: USDA, 2002. CD-ROM

STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H. Calagem e adubação. In: **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. 19 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 720 p.

TEDESCO, M.J. et al. **Analysis of soil, plants and other materials**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 150 p.

THOMAS, J. R.; GAUSMAN H. W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, p. 799-802, 1977.

TUCKER, C. J. et al. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, Philadelphia, v. 11, p. 171-189, 1981.

TUMBO, S. D.; WAGNER, D. G.; HEINEMANN, P. H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. **Transactions of the ASAE**, Niles Road, v. 45, n. 3, p. 815-823, 2002.

ZHAO, D. et al. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 89-98, 2005.

ZILLMAN, E. et al. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 682-690, 2006.

5 CAPÍTULO 2 - EFICIÊNCIA DO SENSOR ÓPTICO EM ESTIMAR O POTENCIAL PRODUTIVO E DETERMINAÇÃO DA LEITURA DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO CRÍTICA NO ALGODOEIRO

5.1 Resumo

O desenvolvimento da cultura do algodoeiro é diretamente influenciado pela nutrição nitrogenada, a qual é dependente da fertilização mineral. No entanto, o manejo do nitrogênio (N) nesta cultura é complexo, uma vez que doses elevadas também podem provocar efeitos negativos na produtividade da cultura. Nesse contexto, o ajuste fino na dosagem de N fertilizante, de acordo com a demanda da cultura, é essencial para a obtenção de elevadas produtividades. O presente trabalho teve como objetivos: I - estabelecer a curva de resposta de produtividade do algodoeiro ao N fertilizante, II - determinar a máxima eficiência econômica da fertilização nitrogenada e III - estimar leituras de índice de vegetação (IV) críticas nos diferentes estádios fenológicos visando à fertilização à taxa variada na cultura do algodoeiro. O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2012/13 em um Latossolo Vermelho Amarelo, no oeste do estado da Bahia, em três áreas sob clima tropical com precipitação anual de 1600 mm ano⁻¹ e temperatura média anual em torno de 21°C. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram nas seguintes doses de N: 0, 45, 90, 130, 150, 180 e 220 kg ha⁻¹ aplicadas aos 43 dias após a semeadura (DAS) na área 1 e aos 32 DAS nas áreas 2 e 3. As leituras de IV foram realizadas em três épocas, correspondentes aos 63, 75 e 97 DAS na área 1 e aos 45, 57 e 80 DAS nas áreas 2 e 3, utilizando o sensor óptico N-Sensor ALS® (YARA). Adjacente aos estádios e pontos de leitura de IV, foi realizada a determinação de produtividade do algodoeiro. A produtividade da cultura do algodoeiro apresentou um ajuste quadrático com as doses de N nos três experimentos estudados. A produção variou de 3.709 kg ha⁻¹ (sem N) a 7.133 kg ha⁻¹ (dose para a máxima eficiência técnica - MET) para a área 1, 2.949 kg ha⁻¹ (sem N) a 4.948 kg ha⁻¹ (dose para a MET) para a área 2 e de 3.257 kg ha⁻¹ (sem N) a 4.694 kg ha⁻¹ (dose para a MET) para a área 3. A dose que atingiu a

máxima eficiência econômica foi a de 164, 139 e 167 kg ha⁻¹ de N para as áreas 1, 2 e 3, respectivamente. O IV crítico para o estágio F1 foi igual a 53, 61 e 66 para as áreas 1, 2 e 3, respectivamente.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L. N Sensor. Máxima eficiência econômica. Nitrogênio.

5.2 Introdução

O N geralmente é um dos principais fatores limitantes à produtividade do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.). Segundo Staut e Kurihara (2001), o N é fundamental no desenvolvimento da planta, principalmente dos órgãos vegetativos. Segundo Rosolem, Zancanaro e Tessaro (2007) a exportação de N pelo algodoeiro é de 50 a 85 kg de N para produzir uma tonelada de algodão em caroço, dependendo da variedade e das condições edafoclimáticas.

A determinação da dose de N no algodoeiro é uma decisão complexa. Pesquisas evidenciam distintas respostas da cultura quanto à aplicação de N, e trabalhos realizados por Silva et al. (1993) reportaram que doses acima de 70 kg ha⁻¹ não seriam econômicas. No entanto, Ferreira et al. (2004) observaram, em anos com maior precipitação, respostas à dose de 140 kg ha⁻¹.

Para expectativas de produtividade de 5.000 kg ha⁻¹, Carvalho, Ferreira e Staut (2007) preconizaram o uso de 20-25 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 125 kg ha⁻¹ em cobertura. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2006), é recomendada a aplicação de 120 a 130 kg de ha⁻¹ de N em solos argilosos e de 150 kg ha⁻¹ de N em solos arenosos, parcelando as aplicações em 15-30 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em duas aplicações em cobertura, sendo a primeira aplicação entre os 25–30 dias após a emergência (DAE) e a segunda aos 55-60 DAE, no estágio F1.

O N, quando aplicado em doses adequadas, estimula o crescimento e o florescimento do algodoeiro, aumentando a produtividade e melhorando a qualidade da pluma (STAUT; KURIHARA, 2001). Nesse sentido, em situações em que for constatada a deficiência de N no início do florescimento, ocorre um retardamento no

ciclo da cultura (MALIK; EVENSON; EDWARDS, 1978). Da mesma maneira, Hutmacher et al. (2004) afirmaram que doses excessivas de N estimulam demasiadamente o crescimento vegetativo e, conseqüentemente, há diminuição da qualidade da pluma. Portanto, a deficiência ou o excesso de N afetam negativamente o crescimento das plantas de algodão, a retenção de capulhos, a produtividade e a qualidade das fibras (REDDY et al., 2004). Além disso, Cisneros e Godfrey (2001) salientam que o excesso de N pode afetar indiretamente a qualidade das fibras, pelo aumento das infestações de pulgões, gerando pegajosidade nos capulhos.

Segundo Rosolem, Zancanaro e Tessaro (2007), aplicações tardias de N em cobertura não proporcionam aumento de produtividade, devido à indução de um maior crescimento vegetativo, que alonga o ciclo da planta, e, conseqüentemente, incrementa a queda de estruturas reprodutivas.

Em estudos realizados por Link, Jasper e Reusch (2005), os autores evidenciaram que informações a campo sobre variabilidade espacial do estado nutricional de plantas são muito valiosas para a prescrição da dose variável de N. Segundo Peñuelas e Filella (1998), a reflectância vegetal é uma eficiente indicadora da quantidade de biomassa e do estado nutricional das plantas, a qual se reflete em produtividade (GROHS et al., 2009). Estudos realizados por Motomyia et al. (2012) relataram a capacidade do sensor óptico (Crop Circle® ACS-210, Holland Scientific, Inc. Lincoln, NE) de avaliar o potencial produtivo do algodoeiro. Resultados semelhantes foram encontrados por Solari et al. (2008) na cultura do milho e por Bredemeier et al. (2013) na cultura do trigo.

Com isso, o uso de sensores tem sido intensificado nos últimos anos, aumentando o número de estudos que visam à otimização de bandas e índices espectrais com mais sensibilidade à quantidade de N absorvido pelas culturas. Esses estudos têm comprovado a eficiência do IV na prescrição de doses ótimas de N (REUSCH, 2003; SCHMIDHALTER et al., 2003; MISTELE, GUTSER, SCHMIDHALTER, 2004).

A cultura do algodoeiro, pelo seu elevado valor econômico e pela demanda de ajuste fino na fertilização nitrogenada, apresenta elevado potencial de utilização da dose variada de N baseada em sensores ópticos. No entanto, são escassos os trabalhos que estudam essa tecnologia no território brasileiro. Nesse contexto, objetivou-se com este estudo estabelecer a curva de resposta de produtividade no algodoeiro à aplicação de nitrogênio em diferentes áreas, bem como determinar a

máxima eficiência econômica e estimar leituras de IV críticas para subsidiar o uso do sensor óptico na fertilização à taxa variada de N na cultura do algodoeiro.

5.3 Material e métodos

Os detalhes experimentais, as avaliações realizadas e os manejos adotados durante a condução do experimento foram descritos no Capítulo 1. Apenas serão apresentadas nesta seção algumas peculiaridades não descritas anteriormente.

5.3.1 Avaliações de produtividade da cultura do algodoeiro

A colheita foi realizada no dia 04 de julho de 2013, e, para a determinação da produtividade, foi realizada coleta manual de capulhos em dois metros lineares de duas fileiras para cada parcela nas três áreas, obtendo-se a massa de capulho com caroço sobre a qual, posteriormente, foi aplicado um fator de multiplicação para se obter a produtividade em kg ha⁻¹.

5.3.2 Análises dos resultados

Os dados obtidos foram submetidos à análise descritiva e de variância (ANOVA) para revelar a existência de significância. As médias foram comparadas pelo teste de tukey ($p < 0,05$) utilizando o programa estatístico ASSISTAT (SILVA; AZEVEDO, 2009). Para a análise de regressão entre os parâmetros avaliados foi utilizado o *software* Sigma Plot 11.

Para se determinar a dose de MET, utilizou-se a equação ajustada entre produtividade e doses de N fertilizante. Já para a determinação da máxima eficiência econômica (MEE), foi utilizada a metodologia proposta por Raij (1991), igualando-se a primeira derivada da equação de regressão correspondente à produtividade no valor

zero, e a relação entre preços do insumo (R\$ por kg de N, na forma de ureia) e do produto (R\$ por kg de algodão em caroço), considerado-se os preços vigentes no estado da Bahia, em junho de 2013. Nesse caso, o custo do kg de N foi de R\$ 2,22, e o valor do kg de algodão em caroço foi de R\$ 1,73. A determinação da dose de N que corresponde à MEE foi feita equação 1.

Eq 1.
$$\text{Dose de N} = (b - F) / (2 * a)$$

N = Nitrogênio

b = coeficiente linear.

F = relação entre os preços do insumo e do produto.

a = coeficiente angular

O valor ideal de cada IV nos diferentes estádios avaliados foi determinado por meio das equações de regressão ajustadas para a dose de MEE.

5.4 Resultados e discussão

5.4.1 Determinação da máxima eficiência econômica

Nas três áreas avaliadas, as doses de N afetaram de forma quadrática a produtividade do algodoeiro (Figura 10), indicando que, a partir de uma determinada dose, o excesso de N passa a ser prejudicial para o desenvolvimento da cultura, como descrito anteriormente por Hutmacher et al. (2004).

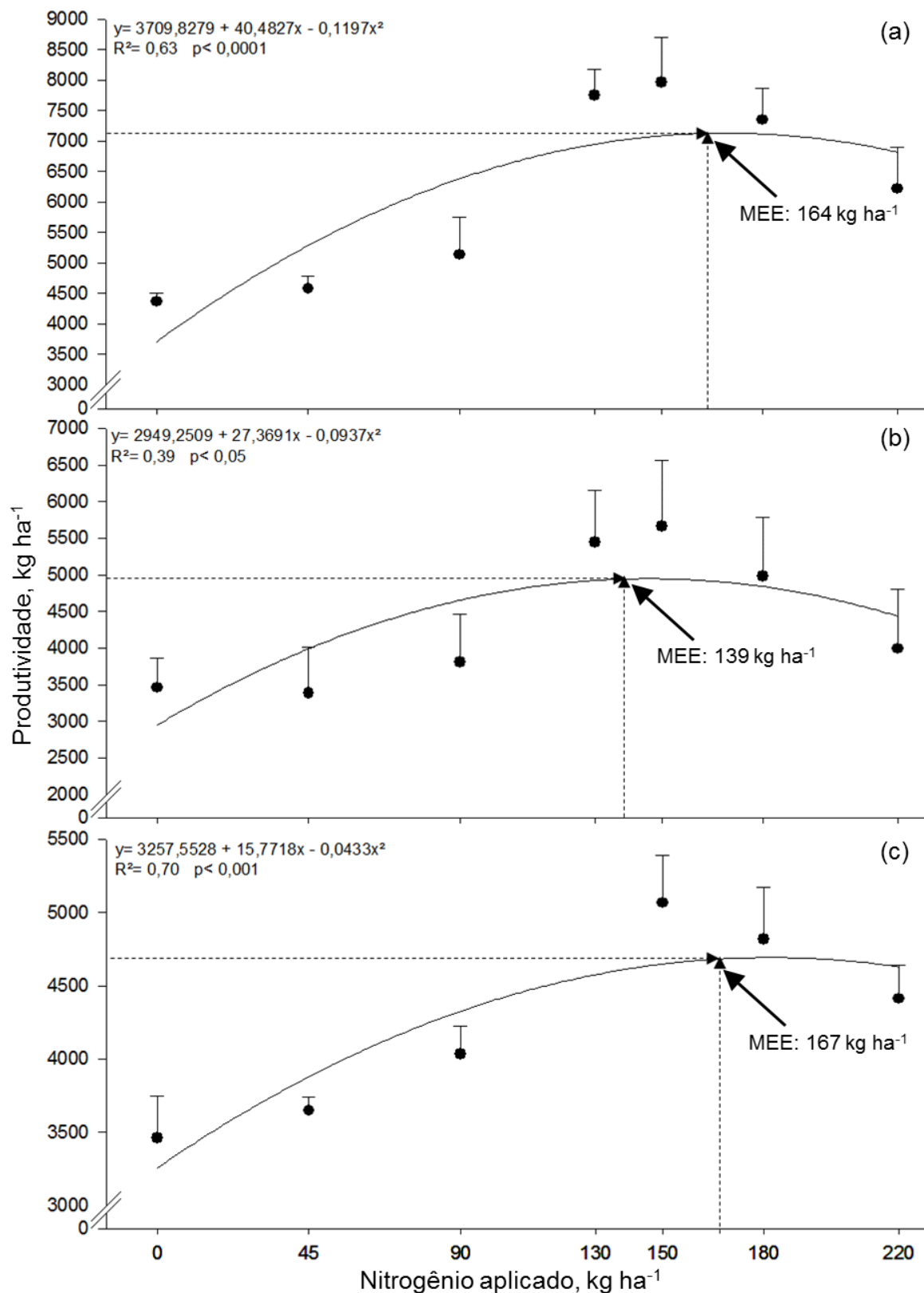


Figura 10 - Efeito das doses de N na produtividade do algodoeiro em caroço para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c). Linha pontilhada representando a máxima eficiência econômica (MEE) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Em relação à área 1 (Figura 10a), de acordo com a equação ajustada, a dose de N que alcançou a máxima produtividade, ou seja, a MET foi a de 169 kg ha⁻¹ de N, a qual atingiu a produtividade de 7.133 kg ha⁻¹ de algodão. Considerando a MEE como a relação entre o preço do insumo e preço do produto, a dose indicada foi de 164 kg ha⁻¹ de N, o que resultaria, de acordo com a equação ajustada, em 7.129 kg ha⁻¹ de algodão em carroço.

Para a área 2, a MET foi atingida com a dose de 146 kg ha⁻¹ de N, que resultou na máxima produtividade, de 4.948 kg ha⁻¹ de algodão (Figura 10b). Já a MEE para essa mesma área foi de 139 Kg ha⁻¹ de N, alcançando a produtividade de 4.943 kg ha⁻¹ de algodão. Com relação à área 3, a MET foi igual a 183 kg ha⁻¹ de N e resultou em 4.694 kg ha⁻¹ de algodão (Figura 10c). A MEE dessa área experimental foi de 167 kg ha⁻¹ de N, alcançando a produtividade de 4.684 kg ha⁻¹.

A variabilidade espacial na mesma área agrícola ou em distintas áreas pronuncia-se não só na produtividade das culturas como também na necessidade de adubação para suprir as exigências nutricionais da planta. Neste estudo, verificou-se pouca diferença entre a dose de N necessária para atingir a MEE dos experimentos 1 e 3 e a produtividade máxima atingida em cada um deles. Assim, enquanto no experimento 1, considerado de elevada produtividade, a MEE foi de 164 kg ha⁻¹ de N para alcançar 7.129 kg ha⁻¹ de algodão, no experimento 3, considerado de baixo rendimento, a MEE foi de 167 kg ha⁻¹ de N para uma produtividade de 4.684 kg ha⁻¹ de algodão. Nesse caso, embora a MEE tenha sido semelhante entre os experimentos, a produtividade foi 34 % maior no experimento 1 do que no 3.

Os resultados verificados neste estudo corroboram os encontrados por Motomyia et al. (2012), que reportaram incremento na produtividade do algodoeiro com as doses de N aplicadas, ajustando-se a um modelo quadrático, em que a máxima produtividade, conforme a derivação da equação de regressão, seria atingida com a dose de 195 kg ha⁻¹.

A elevada demanda de N pelo algodoeiro para alcançar elevadas produtividades sugere que a quantidade de N fornecida pelo solo não é suficiente para atender à necessidade da cultura (MOTOMYIA et al., 2012). Na maioria dos experimentos realizados na região do cerrado, em solos de textura média a argilosa e em condições de sequeiro, respostas econômicas foram obtidas com doses de 100 a 130 kg ha⁻¹ de N em cobertura. Ainda, respostas a doses mais elevadas podem ocorrer em função da baixa eficiência agrônômica do N (MAPA, 2006).

O ajuste quadrático da produtividade demonstra que a aplicação de elevadas doses de N tem um efeito negativo no desenvolvimento do algodoeiro (Figura 10). Esse resultado é decorrente do aumento da absorção de N e pode resultar em desequilíbrio nutricional, induzindo ao excesso de desenvolvimento vegetativo (MAPA, 2003).

5.4.2 Eficiência do sensor óptico em estimar o potencial produtivo

De maneira geral, as doses de N, a produtividade do algodoeiro e o IV correlacionaram-se fortemente entre si na maioria das épocas e dos locais investigados (Tabelas 7, 8, 9).

Tabela 7 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 1 (Correntina, Bahia, 2013).

	Estádio F1 (63 DAS)	Estádio F4 (75 DAS)	Estádio C4 (97 DAS)
	IV		
Doses de N	0,93***	0,78***	0,75***
Produtividade, kg ha ⁻¹	0,79***	0,62**	0,60**
Nº de Observações	21	21	21

^{ns} não significativo a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; *** significativo a 0,1% de probabilidade; **** significativo a 0,01% de probabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 8 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 2 (Correntina, Bahia, 2013).

	Estádio B1 (45 DAS)	Estádio F1 (57 DAS)	Estádio F8 (80 DAS)
	IV		
Doses de N	0,66**	0,77***	0,82***
Produtividade, kg ha ⁻¹	0,13ns	0,42ns	0,40ns
Nº de Observações	21	21	21

^{ns} não significativo a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; *** significativo a 0,1% de probabilidade; **** significativo a 0,01% de probabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 9 - Correlação entre índice de vegetação, doses de N (kg ha⁻¹) aplicado e produtividade (kg ha⁻¹) em três estádios de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na área 3 (Correntina, Bahia, 2013).

	Estádio B1 (45 DAS)	Estádio F1 (57 DAS)	Estádio F8 (80 DAS)
	IV		
Doses de N	0.85***	0.83***	0.75***
Produtividade, kg ha ⁻¹	0.79***	0.72***	0.70**
Nº de Observações	18	18	18

^{ns} não significativo a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; *** significativo a 0,1% de probabilidade; **** significativo a 0,01% de probabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Para a área 1 (Tabela 7), as doses de N apresentaram elevada correlação com as leituras de IV, independentemente do período de avaliação, com destaque ao maior coeficiente de correlação verificado na primeira avaliação aos 63 DAS (estádio F1) ($r = 0,93$; $p < 0,001$), a mesma resposta foi encontrada entre o IV e a produtividade no estágio F1, reforçando que as leituras realizadas nesse período são preferenciais visando à prescrição da fertilização nitrogenada.

Na área 2, diferentemente da primeira área, a maior correlação entre o IV e as doses de N foi verificada no estágio F8 (80 DAS) (Tabela 8). Nesse local, não houve relação entre a produtividade e o IV em nenhum dos períodos avaliados, fato esse decorrente de *déficits* hídricos ocorridos em estádios críticos para a definição da produtividade da cultura.

Para a área 3 (Tabela 9), o maior coeficiente de correlação obtido entre o IV e as doses de N ($r = 0,85$; $p < 0,001$) foi observado no estádio B1 aos 45 DAS. Nesse mesmo estádio, foi constatada a maior correlação entre a produtividade e as leituras de IV ($r = 0,79$; $p < 0,001$).

Neste estudo, as leituras de IV, além de refletirem com eficiência as doses de N e o estado nutricional da planta, também podem prever a produtividade da cultura. Resultados semelhantes foram anteriormente reportados por Motomyia et al. (2012). Esse resultado pode ser observado na figura 11, para a área 1, em que a leitura de IV realizada no estádio F1 (Figura 11a) estimou a produtividade da cultura com ajuste quadrático.

Destaca-se, ainda, que a leitura de IV foi realizada no estádio F1, concordando com o proposto por Fridgen e Varco (2004). De forma análoga ao verificado na área 1, a área 2 apresentou correlação entre o IV obtido no estádio F1 e a produtividade do algodoeiro (Figura 12a). Entretanto, as leituras realizadas nos demais estádios não apresentaram relação com a produtividade da cultura (Figuras 12b e 12c).

O mesmo comportamento foi encontrado para a área 3, aonde o estádio F1 apresentou maior correlação (Figura 13b) entre os três estádios avaliados.

Buscaglia e Varco (2002) e Motomyia et al. (2012), avaliando o uso do N Sensor na determinação do IV em plantas de algodoeiro, reportaram maior relação nas leituras realizadas no estádio F1, referente ao início da floração da cultura. Os resultados encontrados no presente estudo vão ao encontro dos trabalhos citados anteriormente, notadamente nas três áreas avaliadas.

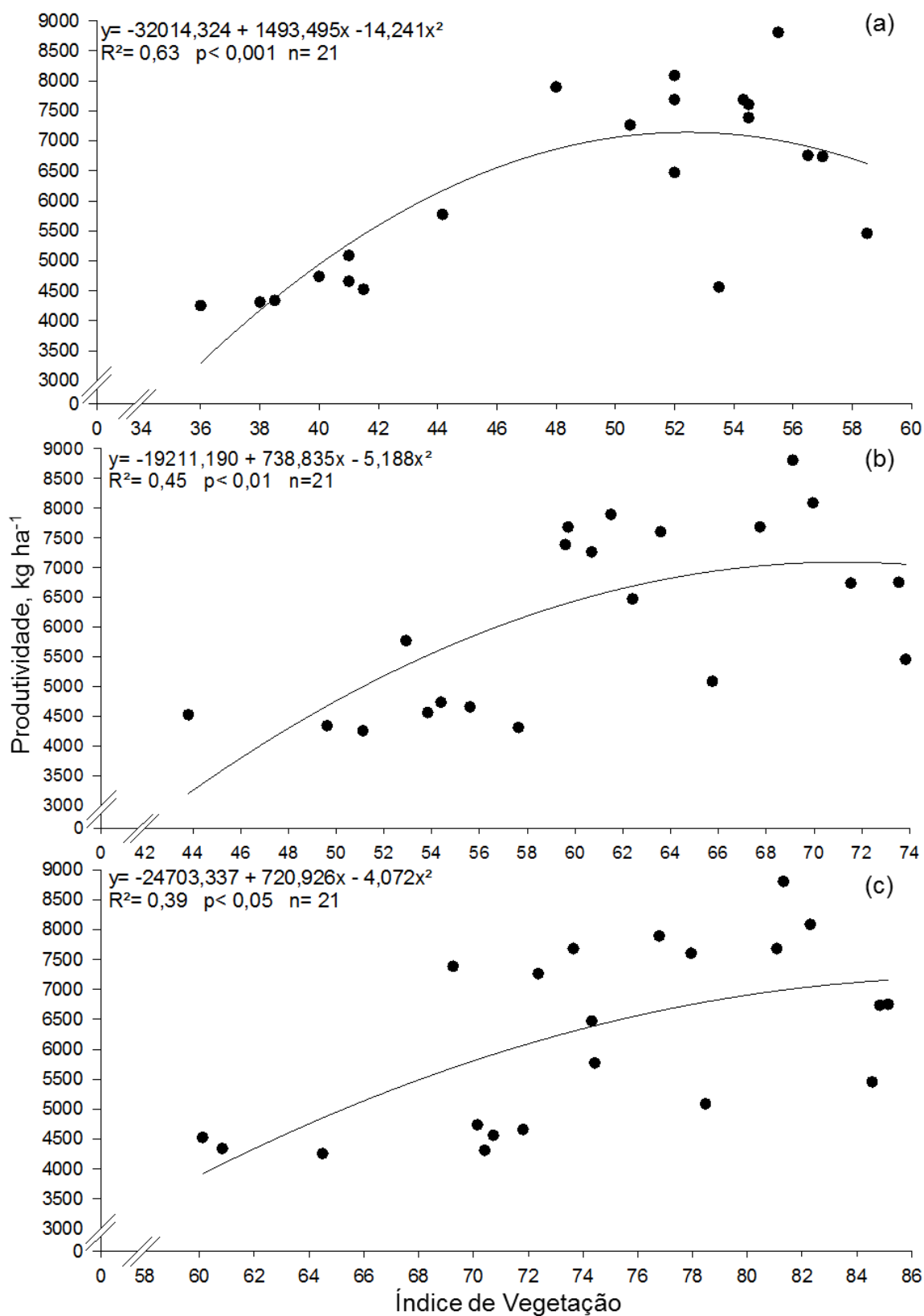


Figura 11 - Relação entre o IV e a produtividade do algodão para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 1 (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

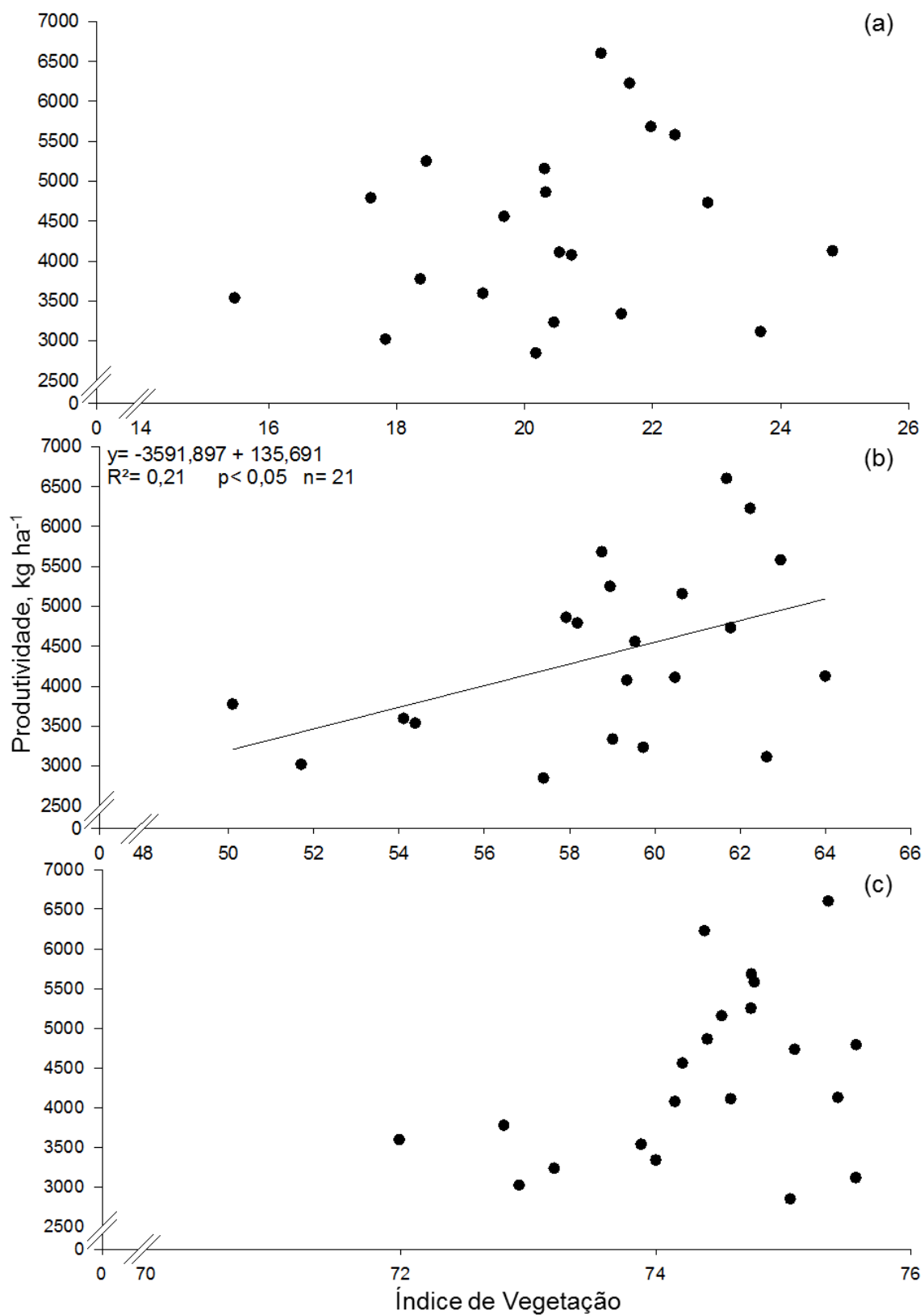


Figura 12 - Relação entre o IV e a produtividade do algodão e para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 2 (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

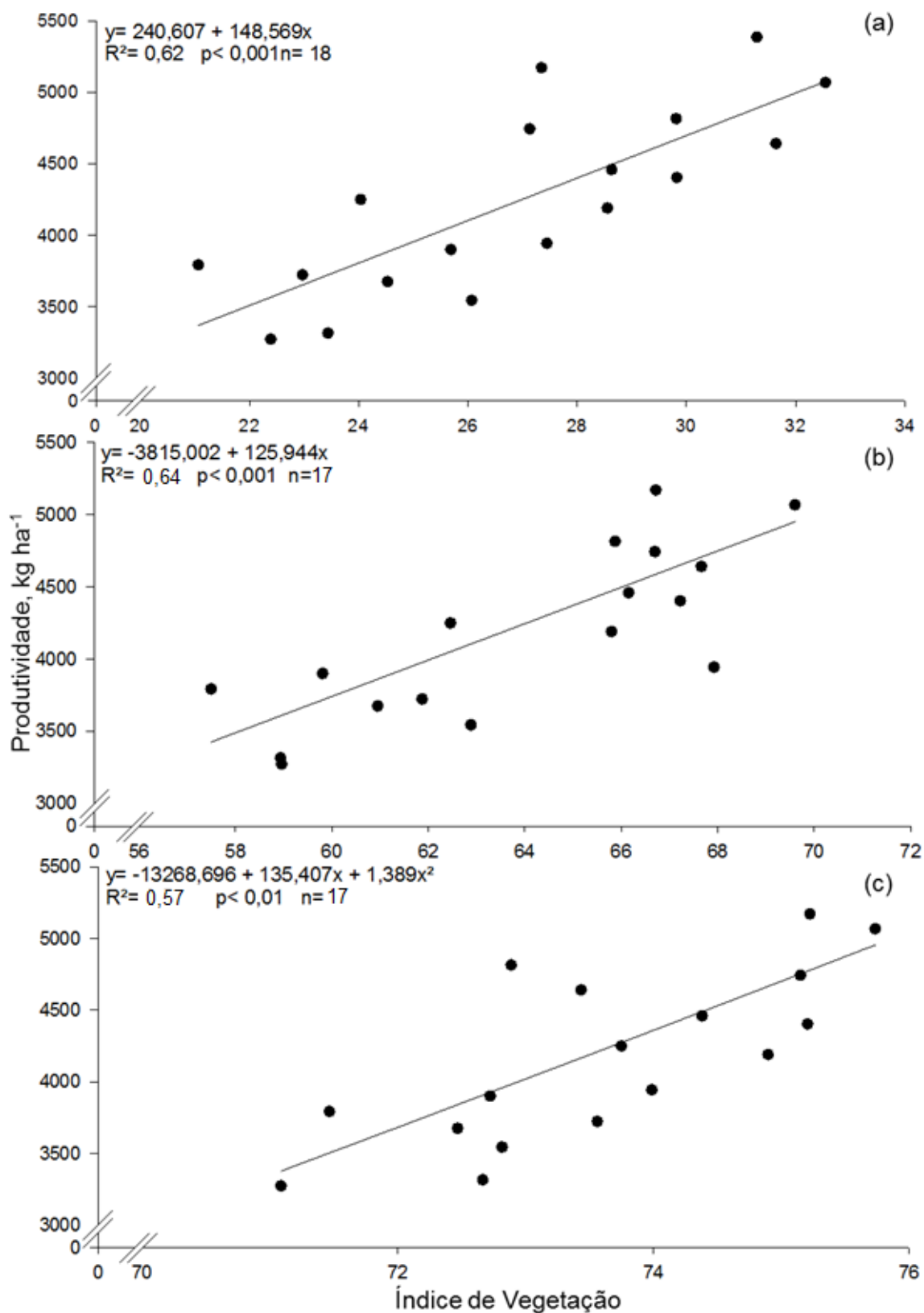


Figura 13 - Relação entre o IV e a produtividade do algodão para a primeira avaliação (a), segunda avaliação (b) e terceira avaliação (c) referentes a área 3 (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.4.3 Determinação dos valores críticos de índice de vegetação por estágio fenológico

De maneira geral, analisando os resultados apresentados na figura 14, nota-se que, na área 1, ou seja, na área que apresentou a maior produtividade (Figura 10a), as leituras do sensor apresentaram maior sensibilidade ao aumento das doses de N (Figura 14a). Além disso, a amplitude do IV entre as doses mínima e máxima foi maior do que nas demais áreas (Figuras 14b e 14c). Nesse sentido, verifica-se que a área 1 apresentou elevada resposta no aumento do IV das plantas a doses de N, tendo esse índice aumentado de forma quadrática com o incremento das doses de N. Além disso, a área 1 apresentou elevada eficiência do sensor já na primeira avaliação, isto é, mesmo quando as plantas de algodão ainda eram jovens a resposta do IV a doses de N foi elevada (Figura 14a). É importante destacar que a primeira leitura de IV da área 1 foi realizada no estágio F1, ao passo que, nas demais áreas, a primeira leitura foi feita no estágio B1. Com isso, tais avaliações, para as últimas áreas, foram realizadas com plantas ainda jovens, apresentando baixo recobrimento vegetal, o que resultou em menor eficiência do sensor e, por consequência, em reduzida amplitude do IV em resposta às diferentes doses de N (Figuras 14b e 14c).

Considerando como referência a dose de N que atingiu a MEE na área 1, ou seja, a dose de 164 kg ha^{-1} (Figura 10a), verifica-se que, a partir dessa dose, as leituras do IV apresentaram menor resposta ao aumento das doses de N. Neste caso, ajustando-se, através da regressão entre a dose de N e IV, os valores críticos do IV (Figura 14a) foram: 53 (estádio F1), 65 (estádio F4) e 78 (estádio C4). Para a área 2 (Figura 14b), a qual apresentou a dose da MEE de 139 kg ha^{-1} , os valores críticos do IV foram: 21 (estádio B1), 61 (estádio F1) e 75 (estádio F8). De maneira semelhante, na área 3 (Figura 14c), que apresentou a dose para a MEE de 167 kg ha^{-1} de N, os valores críticos de IV foram: 29 (estádio B1), 66 (estádio F1) e 75 (estádio F8). Para todas as áreas, a partir dessas doses, notou-se que as leituras de IV atingiram um platô com menor variação, em consequência do aumento da adubação nitrogenada. Esse efeito reduzido da sensibilidade do sensor para doses elevadas de N ocorre pela saturação desse nutriente nas plantas (BLACKMER; SCHEPERS, 1994).

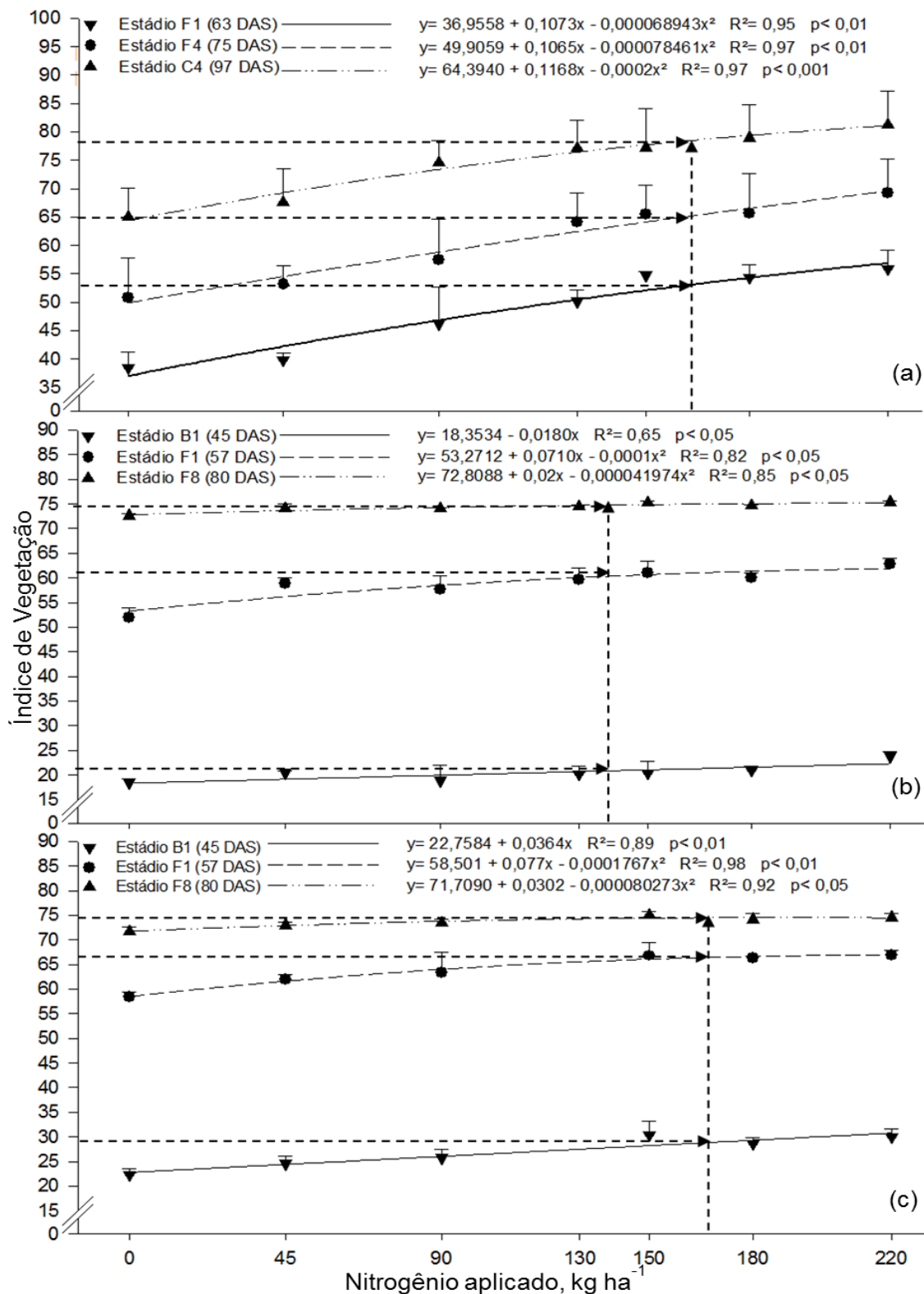


Figura 14 - Relação entre as doses de N aplicadas e o IV em três estádios da cultura do algodoeiro. Primeira avaliação (45 DAS); segunda avaliação (57 DAS); terceira avaliação (80 DAS) para a área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c) (Correntina, Bahia, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Com base na média das três áreas, propõem-se, como uma primeira aproximação, os seguintes valores como IVs críticos para o algodão: B1 = 25; F1 = 60; F4 = 65; F8 = 75; e C4 = 78. Esses valores precisam ser confirmados por outros trabalhos, mas podem vir a ser utilizados para o desenvolvimento de um algoritmo de recomendação da fertilização nitrogenada à dose variada no algodão, inexistente até a realização do presente estudo.

5.5 Conclusões

A produtividade da cultura do algodoeiro foi positivamente influenciada pelas doses de N aplicadas, apresentando ajuste quadrático nas três áreas investigadas. A produção variou de 3.709 kg ha⁻¹ (sem N) a 7.133 kg ha⁻¹ (dose para a MET) para a área 1, de 2.949 kg ha⁻¹ (sem N) a 4.948 kg ha⁻¹ (dose para a MET) para a área 2 e de 3.257 kg ha⁻¹ (sem N) a 4.694 kg ha⁻¹ (dose para a MET) para a área 3.

O sensor apresentou elevada eficiência em estimar o potencial produtivo da cultura, apresentando maior eficiência quando a cultura encontrava-se no início do florescimento.

Foi possível determinar valores críticos de IV para diferentes estádios fenológicos, que variaram de 25, no estágio B1, a 78, no estágio C4. O estágio F1, o mais recomendado para a realização das leituras com o sensor, apresentou IV crítico de 60.

5.6 Literatura citada

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 25, p. 1791-1800, 1994.

BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 7, p.1147-1154, 2013.

BUSCAGLIA, H.J.; VARCO, J.J. Early detection of cotton leaf nitrogen status using leaf reflectance. **Journal of Plant Nutrition**, Austin, v. 25, p. 2067–2080, 2002.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão, 2007. p. 581-647.

CISNEROS, J. J.; GODFREY, L.D. **Effects of nitrogen fertility**. California. In Proc. Beltwide Cotton Conferences, New Orleans, v. 1, p. 961-964, 2001.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa- CNPS, 2006. 400 p

FERREIRA, A. C. B. et al. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v. 58, n. 1, p. 131-138, 2001.

FERREIRA, G. B. et al. **Resultados de pesquisas com a cultura do algodão no oeste e sudoeste da Bahia, safra 2003/2004**. Campina grande: Embrapa Algodão, 2004. (Documentos,133)

FREIRE, E. C. **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: Embrapa Algodão (Associação Brasileira dos Produtores de Algodão). Disponível em: <<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/busca?b=ad&id=691360&biblioteca=vazio&busca=aLGOD%C3%83O&qFacets=aLGOD%C3%83O&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

FRIDGEN, J. L.; VARCO J. J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 63-69, 2004.

GROHS, D. S. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 101-112, 2009.

HUTMACHER, R. B. et al. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin valley of California. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 48-62, 2004.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination—impact of seed rate, variety and growth stage. In: VAN HENTEN, E. J.; GOENSE, D.; LOKHORST, C. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 7., 2009, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands: 7th European conference on precision agriculture. Academic Publishers, 2009. p. 23–30.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388 p.

LINK, A.; JASPER, J.; REUSCH, S. Suitability of different crop parameters for the determination of site-specific nitrogen fertilizer demand. In: STAFFORD, J. V. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 5., 2005, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands: 5th European Conference on Precision Agriculture. Academic Publishers, 2005. p. 297-302.

MALIK, M. N. A.; EVENSON, J. P.; EDWARDS, D. G. The effect of level of of nitrogen nutrition on carliness in upland cotton (*Gossypium hirstum* L.). **Australian Journal of Agricultural Research**, New Zeland, v. 29, p. 1213-1221. 1978.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Calagem e Adubação do Algodoeiro no Cerrado**. Circular Técnico, n. 92, Campina Grande, 2003.

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manejo da adubação Nitrogenada do algodoeiro no Sistema plantio direto com Integração lavoura-pecuária, no Cerrado de Goiás**. Circular Técnico, n. 199, Campina Grande, 2006.

MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 313-317, 2001.

MISTELE, B.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2004, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis, 2004.

MOTOMYIA V. et al. Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1159-1165, 2012.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in Plant Science**, Berkeley, v. 3, n. 4, p. 151–156, 1998.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343p.

REDDY, V. S. et al. KIC, a novel Ca²⁺ binding protein with one EF-hand motif, interacts with a microtubule motor protein and regulates trichome morphogenesis. **Plant Cell**, Florida, v. 16, p. 185-200, 2004.

REUSCH, S. Optimisation of oblique-view remote measurement of crop Nuptake under changing irradiance conditions. In: STAFFORD, J.; WERNER, E. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 4., 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin, The Netherlands: 4th European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, 2003. p. 573-578.

ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L. Z.; TESSARO, L. C. Nitrogênio e enxofre na cultura do algodoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, 2007. p. 321-347.

SCHMIDHALTER, U. et al. Field-scale validation of a tractor based multispectral crop scanner to determine biomass and nitrogen uptake of winter wheat. In: STAFFORD, J.; WERNER, E. (ed.). **PRECISION AGRICULTURE**, 4., 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin, The Netherlands: 4th European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, 2003. p. 615- 619.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 66, p. 151-164, 2000.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Principal components analysis in the software assistat-statistical assistance. In: **WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN**

AGRICULTURE, 7., 2009, San Jose. **Proceedings...** San Jose: St. Joseph: ASABE, 2009. 5 CD-ROM.

SILVA, N. M. et al. Efeitos da adubação nitrogenada e de regulador de crescimento na cultura algodoeira. In: REUNIÃO NACIONAL DO ALGODÃO, 7., Cuiabá, 1993. **Resumos...** Cuiabá: EMPAER-MT/EMBRAPA/CNPA, 1993. p. 215.

SOLARI, F. J. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 571-579, 2008.

STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H. Calagem e adubação. In: **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. 19 p.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo apontam para a necessidade da realização de trabalhos futuros com o intuito de investigar o estágio de desenvolvimento mais adequado para a utilização do N-Sensor na cultura do algodoeiro, uma vez que as aplicações tardias podem prejudicar o desenvolvimento da cultura.

Foram obtidas altas correlações entre as leituras do sensor e as doses de N aplicadas. Além disso, o sensor foi eficiente em detectar variações nos atributos vegetativos da cultura. Entretanto, faz-se necessária a realização de demais estudos para determinar o estágio de desenvolvimento mais apropriado para efetuar as aplicações à taxa variada utilizando o N-Sensor. Dessa forma, haverá maior subsídio de informações para o uso correto do N na cultura do algodoeiro para as áreas comerciais do cerrado brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAPA: Associação Brasileira de Produtores de Algodão. **Área, produção e produtividade do Brasil**. Brasília. 2012. Disponível em: <<http://www.abrapa.com.br/estatisticas/Paginas/area-producao-produtividade-brasil.aspx>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BLACKMORE, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 25, p. 1791-1800, 1994.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: Virginia Polytechnic Institute, 1987. 551 p.

COLWELL, R. N. Manual of remote sensing. **American Society of Photogrammetry and Remote Sensing**, Louisville, v. 2, p. 138-336, 1983.

FRAISSE, C. Agricultura de Precisão: a tecnologia de GIS/GPS chega às fazendas. **Revista Fator GIS**, Curitiba, n. 21, p. 28-33, 1998.

HEERMANN, D. F. et al. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 3, p. 47-61, 2002.

HUTMACHER, R. B. et al. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin valley of California. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 48-62, 2004.

KLUTHCOUSKI, J. et al. **Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 64 p.

MOGES, S. M. et al. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, Austin, v. 27, p. 1431-1441, 2004.

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

NOVO, E. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1992. 388 p.

PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de reflectância vegetal visando a aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2011.

ROSSATO, O. B. **Metodologias de avaliação e aplicação de nutrientes nas culturas de cana-de-açúcar e algodão**. 2011. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011.

SCHÄCHTL J. et al. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 6, p. 143-156, 2005.

STEFFEN, C. A. et al. **Sensoriamento remoto: princípios físicos; sensores e produtos e sistema Landsat**. São José dos Campos: INPE, 1981. 72 p.

TARPLEY, L.; REDDY, K. R.; SASSENATH-COLE, G. F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 1814-1819, 2000.

TISDALE, S. L. et al. **Soil Fertility and Fertilizers**. River: Upper Saddle River, NJ 07458, 1993.

WOOD, C. W.; REEVES, D. W.; HIMELRICK, D. G. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status and crop yield: a review. **Proceedings Agronomy Society**, New Zealand, v. 23, p. 1-9, 1993.

WRIGHT, D. L. et al. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, New Zealand, v. 41, p. 287-300, 2004.