

TESE DE DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processos Ambientais

TÍTULO: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE E ESTADO
NUTRICIONAL DA CULTURA DO ALGODÃO IRRIGADO VIA
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

AUTOR: ZIANY NEIVA BRANDÃO

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

Ziany Neiva Brandão

**ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL DA
CULTURA DO ALGODÃO IRRIGADO VIA TÉCNICAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Recursos Naturais.

Campina Grande _____

2009

Ziany Neiva Brandão

**Estimativa da Produtividade e Estado Nutricional da Cultura do Algodão
Irigado via Técnicas de Sensoriamento Remoto**

Orientador

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

2º Orientador

Prof. Dr. Napoleão Esberard de Macêdo Beltrão

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Recursos Naturais.

Área de concentração: Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Transferência de energia e massa na biosfera

Campina Grande, PB

2009



B817e Brandao, Ziany Neiva
Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodao irrigado via tecnicas de sensoriamento remoto / Ziany Neiva Brandao. - Campina Grande, 2009.
129 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

1. Nutricao do Algodoeiro 2. Produtividade 3. Indices de Vegetacao 4. Variaveis Biofisicas 5. Espectrorradiometria de Campo 6. Imagens de Satelite 7. Tese I. Silva, Bernardo Barbosa da Silva, Dr. II. Beltrao, Napoleao Esberard de Macedo, Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 528.835:633.51(043)

ZIANY NEIVA BRANDÃO

ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO
ALGODÃO IRRIGADO, VIA TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

APROVADA EM: 11/12/2009

BANCA EXAMINADORA



Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais- CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr. NAPOLEÃO ESBERARD DE MACEDO BELTRÃO
EMBRAPA ALGODÃO – CAMPINA GRNDE



Dra. DENISE CYBIS FONTANA
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS



Dr. PAULO HENRIQUE CARAMORI
Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR



Dr. PEDRO VIERA DE AZEVEDO
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais- CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr. MARX PRESTES BARBOSA
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais- CTRN
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

A Ewerton e Blenda,

Dedico

"Conhecer não é demonstrar nem explicar, é aceder à visão."

(Antoine de Saint-Exupéry)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Centro de Tecnologia em Recursos Naturais, pela oportunidade de capacitação que me foi dispensada.

À Embrapa Algodão pelo apoio e concessão de espaço físico e recursos financeiros para desenvolvimento deste trabalho.

À Financiadora de Estudos de Pesquisa, FINEP, pelo suporte financeiro para implantação do projeto.

Ao Professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva pela orientação, paciência e sugestões neste trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Algodão, Dr. José Renato Cortez Bezerra e PhD José da Cunha Medeiros, pelo apoio técnico, sugestões, auxílio e suporte financeiro, incluindo este trabalho em seus projetos de pesquisa.

Ao também pesquisador da Embrapa Algodão, Dr. Valdinei Sofiatti, por sua valiosa colaboração na implantação dos experimentos, tendo sido indispensável para conclusão deste trabalho.

Ao Dr. Gilvan Barbosa Ferreira, da Embrapa Roraima, que muito contribuiu para minha formação profissional, com suas maravilhosas sugestões e comentários.

Ao PhD Demóstenes Pedrosa de Azevêdo pelo apoio incondicional e sugestões durante todas as fases desse trabalho.

Ao melhorista do algodoeiro, Dr. Eleusio Curvelo Freire, por ter me incentivado a voltar o foco do meu estudo para a área de sensoriamento remoto.

Ao Dr. Napoleão Esberard de Macêdo Beltrão pela orientação durante a execução deste trabalho.

A Dr^a Rosiane de Lourdes Silva de Lima, por suas sugestões, comentários e suporte técnico.

Aos colegas de pós-graduação, e em especial a Marcus Vinícius Cândido Bezerra, pelas inúmeras informações trocadas e horas dispensadas em realização de trabalhos conjuntos.

Aos funcionários e auxiliares da EMPARN, RN, que tanto contribuíram para a obtenção desses resultados e, em especial, a Francisco Moésio Tôrres, pela colaboração indispensável para a realização do experimento

Aos colegas José Marcelo Dias, José Nilton Dantas Henrique e Givaldo Marques Barbosa, cuja colaboração na condução de diversos trabalhos foi fundamental para o alcance das metas nos prazos adequados.

Ao Professor Dr. Pedro Vieira de Azevedo pela paciência, sugestões e disponibilização de equipamentos.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais pelas informações e conhecimentos repassados.

Aos meus caros amigos, que assim se reconhecem, não sendo necessário denominá-los, pelo respeito, admiração e carinho.

Ao meu esposo e a minha filha aos quais deixei de dedicar muitas horas para desenvolvimento deste trabalho.

A Deus.

SUMÁRIO

Resumo	x
Abstract	xii
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Símbolos	xix
Lista de Abreviaturas	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Resposta espectral da vegetação	5
2.1.1 Índices baseados na diferença normalizada: melhoramento da linearidade	11
2.1.1.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	11
2.1.1.2 Índice de Vegetação por Diferença Renormalizada (RDVI)	12
2.1.1.3 Índice de Vegetação Transformado (TVI)	12
2.1.2 Índices de vegetação baseados nos efeitos do solo	13
2.1.2.1 Índice de Vegetação Ajustado ao solo (SAVI)	13
2.1.2.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI)	13
2.1.3 Índices de vegetação baseados em três faixas espectrais – melhoramento do efeito da clorofila nas folhas	14
2.1.3.1 Índice de Vegetação Triangular Modificado (MTVI2)	14
2.1.4 Quantificação da clorofila nas folhas	15
2.1.4.1 Quantificação da clorofila através de clorofilômetro	16
2.2 Parâmetros Biofísicos e suas Relações com a Nutrição da Planta	17
2.2.1 Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR)	18
2.2.2 Radiação de onda curta incidente e Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) obtidas de imagens	20
2.2.2.1 FPAR obtida no campo	22

2.2.2.2 FPAR obtida através de Índices de Vegetação (IVs)	24
2.2.3 Eficiência do Uso da Luz (ϵ) e a Fitomassa	26
2.3 Relação entre os IVs e a fitomassa do algodoeiro	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 Caracterização da área experimental	30
3.1.1 Localização	30
3.1.2 Clima	31
3.1.3 Solos	31
3.1.4 Águas	32
3.1.5 Cultivar	33
3.2 Tratos fitossanitários e adubação mineral	33
3.3 Métodos	34
3.3.1 Solo	35
3.3.2 Água e dados meteorológicos	35
3.3.3 Instalação do experimento e coleta de dados	38
3.3.4 Determinação da área foliar (AF)	40
3.3.5 Índice de área foliar (IAF)	41
3.3.5.1 Índice de área foliar no campo	41
3.3.5.2 Índice de área foliar por satélite	41
3.3.5.3 Índices de área foliar por espectrorradiometria de campo	44
3.3.6 Determinação dos teores de clorofila e análise foliar	45
3.3.6.1. Diagnose foliar	45
3.3.6.2. Teores de clorofila	46
3.3.7 Determinação da fitomassa acumulada	47
3.3.7.1. Fitomassa no campo - Método destrutivo	47
3.3.7.2. Fitomassa por espectrorradiometria	47
3.3.7.3. Fitomassa por imagens de satélite	48

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Resposta espectral do algodoeiro e sua relação com a adubação nitrogenada e fosfatada	50
4.1.1 Avaliação dos teores foliares de N e P em função das épocas de amostragens	50
4.1.2 Teores de macronutrientes no tecido foliar em função da adubação nitrogenada e fosfatada	52
4.1.3 Efeito da adubação fosfatada sobre os teores foliares de P e a produtividade do algodoeiro	56
4.1.4 Efeito da adubação nitrogenada sobre os teores foliares de N e a produtividade do algodoeiro	60
4.1.5 Índice SPAD e sua relação com o nitrogênio foliar	67
4.2. Avaliação dos índices de vegetação e resposta espectral do algodoeiro irrigado – Espectrorradiometria de Campo	71
4.2.1 Avaliação das relações entre os IVs e as doses de N aplicadas em função das épocas	71
4.2.2 Avaliação das relações entre os IVs e as doses de P ₂ O ₅ aplicadas em função das épocas	75
4.3. Equações preditivas do IAF e Fitomassa do algodoeiro com os dados de espectrorradiometria de campo	78
4.4. Avaliação dos índices de vegetação e resposta espectral do algodoeiro irrigado – Imagens do TM Landsat 5	88
4.5. Desempenho e produtividade do algodoeiro	99
5. CONCLUSÕES	104
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
Apêndice A - Balanço de Energia e Obtenção da Fração Evaporativa - SEBAL	117
Apêndice B - Dados para Irrigação	125

ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO ALGODÃO IRRIGADO VIA TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Ziany Neiva Brandão

2009

Orientador: Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Programa: Recursos Naturais

RESUMO

Técnicas de sensoriamento remoto são alternativas rápidas e econômicas para avaliações precisas do estado nutricional de uma cultura, sendo valiosas no gerenciamento do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) para garantir alta produtividade. Nesse sentido, foi instalado um experimento em campo no município de Apodi, RN, com o objetivo de estimar a produtividade e o estado nutricional do algodoeiro irrigado em relação à fertilização nitrogenada e fosfatada, utilizando variáveis biofísicas obtidas através de técnicas de sensoriamento remoto com dados multiespectrais e de espectrorradiometria de campo, proporcionando subsídios para recomendação da adubação nitrogenada. Adotou-se delineamento experimental de blocos ao acaso com 3 repetições. Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de nitrogênio (0, 90, 180 e 270 kg ha⁻¹), quatro doses de fósforo (0, 120, 240 e 360 kg ha⁻¹) e quatro épocas de avaliação (40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE)). Nas parcelas estudou-se os efeitos das doses de N e P, e nas subparcelas os efeitos das épocas de avaliação. A observação da resposta espectral do algodoeiro foi realizada em campo através de um espectrorradiômetro portátil, operando na faixa de 350 a 1100 nm aos 60, 80 e 100 DAE. Foram também utilizadas três imagens multiespectrais do Mapeador Temático do satélite Landsat 5, obtidas nos dias 01/11/2008, 17/11/2008 e 19/12/2008. Adicionalmente, foram determinados o conteúdo de clorofila, os teores foliares de N e P, índice SPAD, índice de área foliar, altura de plantas, produção da fitomassa e produtividade do algodoeiro, bem como foram utilizados dados da estação meteorológica instalada no local do experimento (5°37'19" S e 37°49'06" W). O estágio de pleno florescimento se apresentou como a melhor época para estimativa das variáveis biofísicas através dos índices de vegetação obtidos tanto por espectrorradiometria de campo como por imagens de satélite. Os dados adquiridos através do espectrorradiômetro portátil possibilitaram a

obtenção de modelos matemáticos para todos os índices de vegetação (IVs) usados na avaliação do estado nutricional e vigor das plantas de algodão. O índice de vegetação com melhor desempenho em resposta à adubação nitrogenada foi o MTVI2, atingindo seu valor máximo quando se aplicou a dose de 250 kg ha⁻¹ de N. É possível a estimativa do IAF e da produção de fitomassa do algodoeiro usando índices espectrais obtidos por espectrorradiometria de campo com alto grau de precisão, tendo sido observados altos índices de correlação entre os IVs e as características biofísicas do algodoeiro, com significância a 1% pelo teste t. Para prever o IAF tanto na época de pleno florescimento, quanto aos 100 DAE, o índice de vegetação que melhor se ajustou ao modelo matemático foi o NDVI, confirmando seu potencial como bom estimador das condições gerais da cultura e da densidade da cobertura vegetada. A produção de fitomassa pode ser estimada em campo através do NDVI, do SAVI ou do TVI, que apresentaram bom desempenho aos 60 e 80 DAE, uma vez que o NDVI pode ser usado como o melhor preditor em todos os estádios fenológicos, tendo apresentado elevado grau de precisão. Por outro lado, os dados multiespectrais do possibilitaram a predição do IAF através dos índices de vegetação, tendo sido constatados elevados coeficientes de correlação, mostrando que a metodologia é adequada à estimativa dessa variável biofísica desde o início da floração até o pleno florescimento do algodoeiro. O MSAVI e o MTVI2 se apresentaram como os melhores índices para predição do IAF em estádios fenológicos menos avançados, enquanto que o NDVI e o TVI mostraram melhor desempenho no estágio de pleno florescimento. A produção de fitomassa pode ser estimada através do modelo de Monteith (1972), se realizada no estágio de pleno florescimento do algodoeiro, ou pode também ser estimada no início da floração através de equação preditiva obtida com o NDVI que apresentou o melhor desempenho para esse fim. Os índices de vegetação obtidos através das imagens de satélite apresentaram desempenhos similares aos observados por espectrorradiometria de campo na predição da produção de fitomassa do algodoeiro, tendo a espectrorradiometria de campo a vantagem ser mais flexível nas datas de avaliação, bem como pode ser utilizada por tratamento, oferecendo melhor precisão para áreas menores. Adicionalmente, foi observado que os IVs obtidos através do espectrorradiômetro portátil apresentaram melhores correlações para predição do IAF do que aqueles índices obtidos através das imagens de satélite, em quaisquer das épocas de avaliação. A produtividade estimada, tanto com o IAF como com a produção de fitomassa obtidos através das imagens do Landsat 5, apresentaram altas correlações com esses parâmetros aos 80 DAE, mostrando a adequação do modelo CASA para esse fim. Os resultados mostram que tanto a espectrorradiometria de campo quanto os dados multiespectrais do satélite são adequados para obtenção das variáveis biofísicas, sendo úteis para avaliação do estado nutricional e do vigor do algodoeiro, viabilizando a correção de possíveis deficiências de nitrogênio na cultura, com restauração total ou parcial da sua produtividade, usando doses suplementares delimitadas a partir do índice SPAD entre os 40 e 90 dias após a emergência aplicadas via fertirrigação.

LINT YIELD AND NUTRITION ESTIMATION OF IRRIGATED COTTON THROUGH REMOTE SENSING TECHNIQUES

Ziany Neiva Brandão

2009

Advisor: Bernardo Barbosa da Silva

Department: Natural Resources

ABSTRACT

Remote sensing techniques are a fast and inexpensive alternative to accurate assessments of nutritional status of a culture, and became valuable in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) management to ensure high yield. In this sense, a field experiment was carried out in Apodi county, RN, Brazil, in order to estimate the lint yield and nutritional status of irrigated cotton regarding to nitrogen and phosphorous fertilization, using biophysical variables obtained through remote sensing techniques with data from a portable spectroradiometer and multispectral data from TM Landsat 5, providing ways to the recommendation of nitrogen fertilization. It was used a Randomized Block Design with 3 replications. The treatments included four N rates (0, 90, 180 and 270 kg ha⁻¹) and four P₂O₅ rates (0, 120, 240 and 360 kg ha⁻¹), and four assessment seasons. (40, 60, 80, 100 DAE). It was studied the effects of N and P combinations in the plots and the effects of assessment seasons in the subplots. The cotton spectral response was evaluated in the field by means of a portable spectroradiometer operating in the range of 350 to 1100 nm at 60, 80 and 100 DAE. Three multispectral images from Thematic Mapper of Landsat 5 were used, obtained in the days 01/11/2008, 17/11/2008 and 19/12/2008. Additionally, it has been determined the leaf chlorophyll content, N and P leaf content, SPAD indices, leaf area index, plant height, phytomass production of cotton plant and lint yield, as well as it was used meteorological data from the station installed in the experimental field (5°37'19" S and 37°49'06" W). The full flowering stage is the best time to estimate the biophysical variables by means of the vegetation indices obtained by both satellite imagery and data from the portable spectroradiometer. With the acquired data through the spectroradiometer it is possible to obtain mathematical models for all vegetation indices (IVs) used to evaluate the nutritional status and cotton plant vigor. The vegetation index with best performance in response to nitrogen fertilization was MTVI2, reaching its maximum value when applied 250 kg ha⁻¹ of N. It is possible to estimate LAI and cotton phytomass yield using spectral indices obtained by spectroradiometer data with high accuracy. It has been observed high correlation coefficients between the IVs and the biophysical characteristics of cotton with significance at 1% by t test. In

order to predict the IAF at the full flowering stage or at 100 DAE, the vegetation index with best fit was the NDVI, confirming its potential as a good estimator of the crop general conditions and canopy density. Phytomass production can be estimated in field by the NDVI, SAVI or the TVI with a good performance at 60 and 80 DAE, since the NDVI can be used as the best predictor in all growth stages, providing high accuracy. Furthermore, the multispectral data from TM Landsat 5 enabled the prediction of LAI through the vegetation indices with high correlation coefficients, showing that the method is suitable for the estimation of biophysical variables since the early flowering stage up to the complete flowering stage. MSAVI and MTVI2 were the best indices for predicting LAI at the early growth stages, while NDVI and TVI showed better performance in the full flowering stage. Phytomass production can be estimated by the model of Monteith (1972), if done during the full flowering stage of cotton or can also be estimated at the early flowering stage through the predictive model obtained with the NDVI, which showed the best performance for this purpose. The vegetation indices obtained from satellite images showed performance similar to those observed by field spectroradiometry in predicting the phytomass production of cotton, where the spectroradiometry has the advantage to be more flexible to schedule the assessment, as well as can be used for each treatment, providing better accuracy for smaller areas. Furthermore, it was observed that the IVs obtained from portable spectroradiometer exhibited better correlation to predict LAI than those indices acquired through satellite images in any of the evaluation phases. The lint yield estimated by the IAF or the phytomass production data acquired from satellite images were highly correlated with these parameters at 80 DAE, showing the capability of the CASA model for that purpose. The results show that both the field spectroradiometry and multispectral satellite data are adequate to obtain the biophysical variables and are useful for evaluating the status and vigor of cotton, making it possible for the correction of crop nitrogen deficiency, with full or partially yield recovering, using supplemental doses bounded by the SPAD index between 40 and 90 days after emergence applied through irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Absorção de fósforo relacionada ao ciclo de crescimento do algodoeiro. Fonte: Adaptado de Rosolem (2001)	8
Figura 2	Curva característica da refletância da vegetação verde, apresentando a faixa espectral de absorção da clorofila. Adaptado de Lillesand e Kiefer (1987)	9
Figura 3	Relações entre a APAR e a PAR como função do NDVI, obtidas por diversos autores. Adaptado de: GOWER et al., 1999; MYNENI et al., 1997; JOEL et al., 1997; DAUGHTRY et al., 1992	19
Figura 4	Etapas computacionais para obtenção de R_s , a superfície. Fonte: Adaptado de ALLEN et al., 2002	22
Figura 5	Modelo para determinação da fitomassa acumulada acima da superfície. Fonte: Adaptado de BRANDÃO et al., 2006	27
Figura 6	Valores médios extraídos das imagens, escolhidos em subconjuntos de 15 pixels para: (a) a Fitomassa acumulada, e (b) o NDVI. Fonte: Brandão et al. (2006)	29
Figura 7	Localização do Município de Apodi, RN, com coordenadas geográficas 05°39'50,4" de latitude sul e 37°47'56,4" de longitude oeste e altitude de 67 m	30
Figura 8	Bacia Apodi – Mossoró. Adaptado de: Plano Estadual de Recursos Hídricos, SEMARH-RN (2008)	32
Figura 9	Instalação do Sistema de Irrigação por Aspersão. (a) Poço. (b) Aspersores. (c) Distribuidor. (d) Sistema Automático de Controle	36
Figura 10	(a) Estação climatológica automática no Campo Experimental da EMPARN, (b) SARB instalado na cultura do algodão	36
Figura 11	Utilização da Sonda Delta T, no campo experimental de Apodi, RN	37
Figura 12	Medição com tensiômetros instalado em diversas profundidades no campo experimental em Apodi, RN	38
Figura 13	Plantio do algodão no campo experimental da EMPARN, em Apodi, RN. (a) Semeadura. (b) Adubação. (c) Tratamentos aos 60 DAE. (d) Sistema de irrigação e diferença de tonalidades nos tratamentos	39
Figura 14	Determinação da área foliar de plantas de algodão através do integrador de área foliar da LICOR modelo LAI-3100	40
Figura 15	Imagem do TM Landsat 5 em 19/12/2008. (a) Composição RGB: 5, NDVI,3 de parte do município de Apodi, mostrando a área experimental e a sede do município.(b) Distribuição dos pixels na área experimental, cujas coordenadas centrais são 5°37'19" S e 37°49'06" W, numa composição RGB: 432, onde os tratamentos foram separados em duas faixas da adubação nitrogenada, quais sejam 0-90 e 180-270 kg ha ⁻¹	43
Figura 16	(a) Espectrorradiômetro da Apogee, que opera na faixa de 350 nm a 1.100 nm, em medições realizadas no campo experimental (Apodi, RN), e (b) Medição da irradiância aos 80 DAE	44
Figura 17	Medidor de clorofila SPAD-502 em utilização na cultura do algodoeiro, em Apodi, RN ..	46
Figura 18	Teor foliar de N em plantas de algodão em função das épocas de amostragens	50

Figura 19	Teor foliar de P em plantas de algodão em função das épocas de amostragens	51
Figura 20	Teores foliares de N (a) e K (b) no algodoeiro em resposta a adubação nitrogenada ..	54
Figura 21	Teores foliares de P (a) e S (b) em plantas de algodão em resposta a adubação fosfatada	55
Figura 22	Teores foliares de P no algodoeiro irrigado, em diferentes estádios fenológicos	56
Figura 23	Teores foliares de P e produtividade de algodão em caroço em resposta a adubação fosfatada	58
Figura 24	(a) Variação da dose de máxima eficiência econômica (DME) e da produtividade em função da relação insumo produto. (b) Calibração dos teores foliares de fósforo em diferentes épocas de amostragem em função das doses de fósforo aplicadas e produtividades obtidas	59
Figura 25	Teores foliares de N em resposta à adubação nitrogenada determinados em plantas de algodão amostradas aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE)	61
Figura 26	Índice SPAD em função da adubação nitrogenada, determinados em plantas de algodão aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE)	62
Figura 27	Teores foliares de N em função do índice SPAD, determinados em plantas de algodão aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE)	64
Figura 28	Valores da produtividade do algodoeiro em resposta à: (a) teores foliares de N, obtidos nas amostragens realizadas aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE), (b) índice SPAD, obtido nas avaliações realizadas aos 40, 60, 80 e 100 (DAE), e (c) doses de N aplicadas	65
Figura 29	Valor limite do teor foliar de N e do índice SPAD para obtenção de 80, 90 e 100% da produtividade máxima	66
Figura 30	Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e a concentração de clorofila <i>a</i> (a) e clorofila <i>b</i> (b) em folhas do algodoeiro	68
Figura 31	Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e a concentração de carotenóides (a) e clorofila <i>total</i> (b) em folhas do algodoeiro	68
Figura 32	Leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e as relações entre: (a) Clorofila <i>total</i> (<i>a+b</i>)/carotenóides e, (b) Clorofila <i>a/b</i> em folhas do algodoeiro. (c) Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e os teores foliares de N em plantas de algodão	69
Figura 33	Relação entre as doses de N aplicadas e os IVs obtidos através de espectrorradiometria de campo no algodoeiro ao longo das épocas de amostragem ..	72
Figura 34	Relações entre as doses de P ₂ O ₅ aplicadas e os IVs obtidos através de espectrorradiometria de campo em plantas de algodão ao longo das épocas de amostragem	76
Figura 35	Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) em plantas de algodão sob regime de irrigação como função dos índices de vegetação, obtidos nas diferentes épocas de amostragem usando dados do espectrorradiômetro. (a) e (b) 60 DAE; (c) e (d) 80 DAE; (e) e (f) 100 DAE.....	79

Figura 36	Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) em plantas de algodão sob regime de irrigação como função do índice de vegetação transformado (TVI), obtido nas diferentes épocas de amostragem usando dados do espectrorradiômetro	80
Figura 37	Equações preditivas para a fitomassa do algodoeiro como função do índice de vegetação transformado (TVI), obtido com espectrorradiometria de campo nos três estádios fenológicos estudados, 60, 80 e 100 DAE	83
Figura 38	Equações preditivas da fitomassa do algodoeiro como função dos índices de vegetação obtidos com espectrorradiômetro, nos três estádios fenológicos estudados (60, 80 e 100 DAE)	84
Figura 39	Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) observado em campo para o algodoeiro irrigado, como função dos índices de vegetação obtidos através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, para o NDVI, SAVI, RDVI, MTVI2 e MSAVI. (a) e (b) aos 34 DAE. (c) e (d) aos 50 DAE. (e) e (f) aos 80 DAE	89
Figura 40	Equações preditivas para o Índice de Área Foliar (IAF) observado em campo como função do Índice de Vegetação Transformado (TVI) obtido através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, aos 34, 50 e 80 DAE ...	90
Figura 41	Equações preditivas para a fitomassa do algodoeiro, como função do Índice de Vegetação Transformado (TVI) obtido através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, aos 34, 50 e 80 DAE	93
Figura 42	Equações preditivas da fitomassa total como função dos índices de vegetação obtidos através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, para o NDVI, SAVI, RDVI, MTVI2 e MSAVI (a) e (b) aos 34 DAE. (c) e (d) aos 50 DAE. (e) e (f) aos 80 DAE	94
Figura 43	Relações entre os IAFs obtidos em campo e os IAFs obtidos através de imagens de satélite. (a) aos 34 DAE. (b) aos 50 DAE. (c) aos 80 DAE	96
Figura 44	Relações entre a fitomassa do algodoeiro em campo e a fitomassa total obtida através das imagens de satélite, por data de passagem do satélite. (a) aos 34 DAE. (b) aos 50 DAE. (c) aos 80 DAE	97
Figura 45	Relações derivadas do IAF e da produção de fitomassa do algodoeiro obtidas por espectrorradiometria de campo como preditores da produtividade no estágio de pleno florescimento (80 DAE) do algodoeiro. (a) Produtividade estimada em resposta ao crescimento do IAF; (b) Produtividade estimada em resposta ao aumento da fitomassa; (c) Produção de fitomassa em resposta ao aumento do índice de área foliar.....	100
Figura 46	Relações derivadas do IAF e da produção de fitomassa, obtidos através dos dados das imagens do satélite Landsat 5, como preditores da produtividade no estágio de pleno florescimento (80 DAE) do algodoeiro. (a) Produtividade estimada em resposta ao crescimento do IAF; (b) Produtividade estimada em resposta ao aumento da fitomassa; (c) Produção de fitomassa em resposta ao aumento do índice de área foliar	102
Figura 47	Diagrama representativo dos passos necessários para obtenção do saldo de radiação à superfície. Fonte: Allen et al., 2002	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF), baseada em seis índices de vegetação (IVs), testadas para a cultura do algodoeiro	25
Tabela 2	Classificação dos solos que compõem a Chapada do Apodi	31
Tabela 3	Produtos agroquímicos aplicados à cultura do algodoeiro na área experimental em Apodi	33
Tabela 4	Características químicas do solo, coletado em três profundidades, no campo experimental, localizado em Apodi, RN	35
Tabela 5	Teores adequados de nutrientes usados na interpretação dos resultados de análise da 5ª folha do algodoeiro, no estágio de máximo florescimento (SILVA e RAIJ, 1996)	45
Tabela 6	Resumo da análise de variância dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S no tecido foliar de plantas do algodoeiro fertilizadas com N e P	53
Tabela 7	Correlação entre produtividade e teor foliar de fósforo no algodoeiro em diferentes estádios fenológicos	57
Tabela 8	Dose de máxima eficiência econômica e física, teores foliares em diferentes épocas de amostragem e produtividade de algodão em caroço sob cultivo irrigado .	60
Tabela 9	Análise de correlação simples entre as variáveis dependentes, índice SPAD, N foliar e produtividade estimada de algodão em caroço, nos quatro estádios fenológicos que determinaram as épocas de avaliação	63
Tabela 10	Valores limites de índice SPAD e doses corretivas de nitrogênio necessárias para elevar a produtividade para diversos percentuais da máxima alcançada nas condições do ensaio estudado	67
Tabela 11	Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos por espectrorradiometria com o IAF e a fitomassa do algodoeiro obtidos em campo em resposta a adubação nitrogenada avaliados aos 60 DAE	73
Tabela 12	Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos por espectrorradiometria com o IAF e a fitomassa do algodoeiro obtidos em campo em resposta a adubação nitrogenada avaliados aos 80 DAE	73
Tabela 13	Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos por espectrorradiometria com o IAF e a fitomassa do algodoeiro obtidos em campo em resposta a adubação nitrogenada avaliados aos 100 DAE	74
Tabela 14	Valores da correlação entre os índices de vegetação obtidos por espectrorradiometria e o IAF obtido em condições de campo em plantas de algodão	81
Tabela 15	Valores da correlação entre os índices de vegetação obtidos por espectrorradiometria e a fitomassa obtida em condições de campo em plantas de algodão	85
Tabela 16	Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de planta obtidas em campo, bem como dos IVs, do IAF _{sat} e da Fitom _{sat} obtidos aos 34 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 01/11/2008 que correspondem à área do experimento	90

Tabela 17	Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de plantas de algodoeiro obtidas em campo, bem como dos IVs, do IAF _{sat} e da Fitom _{sat} obtidos aos 50 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 17/11/2008 que correspondem à área do experimento	91
Tabela 18	Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de planta obtidas em campo, bem como dos IVs, do IAF _{sat} e da Fitom _{sat} obtidos aos 80 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 19/12/2008 que correspondem à área do experimento	91
Tabela 19	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos através das imagens do TM Landsat 5 e o IAF e a fitomassa obtidos em campo no algodoeiro irrigado	91
Tabela 20	Valores de <i>ESUN</i> para o TM Landsat 5 fornecida em ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)	118
Tabela 21	Coeficientes de peso para cada canal, ω_{λ}	118
Tabela 22	Programação de irrigação do algodoeiro em Apodi, RN, safra 2008/2009	125
Tabela 23	Dados obtidos em campo e cálculo da Eto para o algodoeiro irrigado safra 2008/2009 em Apodi, RN	127

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidades
<i>APAR</i>	Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida	$W m^{-2}$
<i>Fitom_Acum</i>	Fitomassa acumulada acima do solo no período <i>t</i> ;	$kg m^{-2}$
<i>fitom_{sat}</i>	Produção de fitomassa da cultura obtida através de imagens multiespectrais do TM Landsat 5	$kg m^{-2}$
<i>cos θ</i>	Cosseno do ângulo de incidência dos raios solares normal à superfície	rad
<i>cos η</i>	Cosseno do ângulo de visada do satélite	
<i>cos z</i>	Cosseno do ângulo zenital solar	
<i>c_p</i>	Calor específico do ar à pressão constante	$J kg^{-1} K^{-1}$
<i>DOY</i>	Dia do ano (sequencial).	
<i>dr</i>	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol	<i>Ud Astron.</i>
<i>dT</i>	Diferença de temperatura entre a superfície e um nível de referência	K
<i>e_a</i>	Pressão real de vapor	<i>kPa</i>
<i>e_s</i>	Pressão de saturação do vapor	<i>kPa</i>
<i>ESUN_λ</i>	Irradiância solar espectral no topo da atmosfera	$W m^{-2} \mu m^{-1}$
<i>ET_c</i>	Evapotranspiração da cultura	$mm h^{-1}$; $mm dia^{-1}$
<i>ET_d</i>	Evapotranspiração diária	$mm dia^{-1}$
<i>ET₀</i>	Evapotranspiração de referência	$mm h^{-1}$; $mm dia^{-1}$
<i>f_{PARmax}</i>	Valor limite assintótico da absorção da PAR	
g	Constante gravitacional terrestre	$m s^{-2}$
G	Fluxo de calor no solo	$W m^{-2}$
<i>G_{SC}</i>	Constante solar	$W m^{-2}$
H	Fluxo de calor sensível	$W m^{-2}$
h	Altura média da vegetação	m
I	Radiação transmitida	$W m^{-2}$
<i>IAF</i>	Índice de Área Foliar	
<i>IAF_{sat}</i>	IAF obtido através de imagem de satélite	
I₀	Radiação incidente no topo da cobertura vegetal	$W m^{-2}$
<i>IV_{max}</i>	Valor assintótico do índice de vegetação para IAF tendendo ao máximo	
k	Coefficiente de extinção da luz	
L	Constante de ajuste do solo para o SAVI	
L	Comprimento de Monin-Obukhov	m
<i>L_{i,max}</i>	Radiância espectral máxima	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
<i>L_{i,min}</i>	Radiância espectral mínima	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$

<i>ND</i>	Número Digital	
<i>P</i>	Pressão atmosférica	<i>kPa</i>
<i>r_{ah}</i>	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	<i>s m⁻¹</i>
<i>PAR</i>	Radiação Fotossinteticamente Ativa	<i>W m⁻²</i>
<i>R_{IVP}</i>	Refletância no infravermelho próximo	
<i>R_{λi}</i>	Refletância planetária da banda <i>i</i>	
<i>R_G</i>	Radiação solar global	<i>MJ m⁻² dia⁻¹</i>
<i>R_{L1}</i>	Radiação de onda longa emitida pela superfície	<i>W m⁻²</i>
<i>R_{L1}</i>	Radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera	<i>W m⁻²</i>
<i>R_n</i>	Saldo de radiação	<i>W m⁻²</i>
<i>R_{S1}</i>	Radiação solar incidente	<i>W m⁻²</i>
<i>R_V</i>	Refletância na região do vermelho	
<i>s</i>	Inclinação da superfície	<i>rad</i>
<i>S</i>	Constante solar	<i>Wm⁻²</i>
<i>t</i>	Hora de passagem do satélite	<i>h</i>
<i>T</i>	Temperatura média do ar	<i>K, °C</i>
<i>T_{opt}</i>	Temperatura média durante o mês de máximo NDVI	<i>°C</i>
<i>T_{men}</i>	Média mensal da temperatura do ar	<i>°C</i>
<i>T_s</i>	Temperatura da superfície	<i>K, °C</i>
<i>u_x</i>	Velocidade do vento	<i>ms⁻¹</i>
<i>u_*</i>	Velocidade de fricção	<i>m s⁻¹</i>
<i>u₁₀₀</i>	Velocidade do vento ao nível de 100 m	<i>m s⁻¹</i>
<i>z</i>	Altitude local	<i>m</i>
<i>z_{0m}</i>	Coeficiente de rugosidade	<i>m</i>
<i>α</i>	Albedo da superfície	
<i>γ</i>	Ângulo azimutal da superfície	<i>rad</i>
<i>Δ</i>	Inclinação da curva de pressão de vapor	<i>kPa.°C</i>
<i>ΔT</i>	Diferença de temperatura do ar próxima à superfície	<i>K, °C</i>
<i>δ</i>	Declinação do Sol	<i>rad</i>
<i>ε</i>	Fator de uso da eficiência da luz	<i>(g MJ⁻¹)</i>
<i>ε[*]</i>	Valor máximo global uniformizado do uso de eficiência da luz,	<i>(g MJ⁻¹)</i>
<i>ε₀</i>	Emissividade da superfície	
<i>ε_{NB}</i>	Emissividade termal	
<i>ε_{atm}</i>	Emissividade atmosférica	
<i>λE</i>	Fluxo de Calor Latente	<i>W m⁻²</i>
<i>φ</i>	Latitude	<i>rad</i>

λ	Fração evaporativa instantânea	
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
ρ	Densidade do ar úmido	kg m^{-3}
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar	
ω	Ângulo horário	rad

LISTA DE ABREVIATURAS

APAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (<i>Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>)
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CARI	Índice da Razão de Absorção da Clorofila (<i>Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)
CASA	<i>Carnegie Ames Stanford Approach</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAE	Dias Após a Emergência
DME	Dose de Máxima Eficiência econômica
DMSO	Dimetilsulfóxido - Solvente orgânico com fórmula (CH ₃) ₂ SO
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
DRIS	Sistema integrado de diagnose e recomendação para avaliação do estado nutricional
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN-RN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
FPAR	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (<i>Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>)
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
IV	Índice de Vegetação
IVP	Infravermelho-próximo no espectro eletromagnético (ou NIR <i>Near infrared</i>)
MME	Ministério das Minas e Energia
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Melhorado (<i>Modified Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)
MSR	Índice Razão Simples Modificado (<i>Modified Simple Ratio</i>)
MTVI2	Índice de Vegetação Triangular Modificado (<i>Modified Second Triangular Vegetation Index</i>)
ND	Número Digital
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
NPP	Produção primária (<i>Net Primary Production</i>)
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa (<i>Photosynthetically Active Radiation</i>)
RDVI	Índice de Vegetação por Diferença Renormalizada (<i>Renormalized Difference</i>)

	<i>Vegetation Index)</i>
<i>Red-edge</i>	Região do espectro eletromagnético onde há uma rápida elevação da refletância da vegetação
SARB	Sistema Automático de Razão de Bowen
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado aos Efeitos do Solo (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SEMARH-RN	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPAD-502	Clorofilômetro ou medidor de clorofila portátil, produzido pela Minolta
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
SR	Sensoriamento Remoto
TM Landsat 5	<i>Thematic Mapper of Land Remote Sensing Satellite</i>
TM	
TVI	Índice de Vegetação Transformado (<i>Transformed Vegetation Index</i>)
TVI _x	Índice de Vegetação Triangular (<i>Triangular Vegetation Index</i>)
V	Região do vermelho do espectro eletromagnético (ou <i>Red</i>)

1. Introdução

Atualmente, o grande desafio da agricultura sustentável é aumentar a produtividade agrícola, conservando e otimizando os recursos naturais, o que requer esforços e a aplicação das mais variadas áreas do conhecimento técnico-científico e ambiental em cada ecossistema. Nesse sentido, estudos têm se concentrado para aumentar a produtividade agrícola, objetivando atender a crescente demanda mundial, sem que haja, entretanto, aumento das áreas de produção, preservando-se assim o meio ambiente.

Nas últimas décadas a estimativa da produtividade de culturas agrícolas tem sido prioritária para muitos programas de pesquisa. Embora existam diversos métodos de monitoramento da cultura e estimativa da produção, os métodos convencionais demandam muito tempo e mão-de-obra para executar tornando-os dispendiosos. Em geral, como alternativa para redução dos custos são usadas pequenas amostras da área de campo, o que os torna muitas vezes imprecisos (CLEVERS, 1997). Para culturas irrigadas, onde as plantas não sofrem déficit hídrico, concentrações de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio, são os fatores mais importantes no desenvolvimento das plantas (MARSCHNER, 1995).

Num sistema de produção de algodão, o gerenciamento dos níveis de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), é um fator imprescindível para obtenção de alta produtividade e melhoria da qualidade da fibra. Muitos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de determinar os efeitos tanto de déficit hídrico como da deficiência desses nutrientes na fotossíntese, no crescimento e na produção de fitomassa do algodoeiro, usando técnicas de sensoriamento remoto para analisar a influência desses efeitos na resposta espectral da cultura (ZHAO et al., 2007; REDDY e ZHAO, 2005). Assim, a necessidade de redução dos custos de produção também leva muitos pesquisadores em vários países a usarem técnicas de manejo do solo mais adequadas e a avaliarem seus efeitos na produção. Combinadas, essas técnicas visam à obtenção da máxima produtividade e qualidade da fibra com o menor custo possível, tornando a cultura mais competitiva e dando sustentabilidade a cadeia produtiva do algodoeiro (BRANDÃO et al., 2006).

A principal característica do sistema de cultivo do algodoeiro em vigência nas principais regiões produtoras é a forte dependência em insumos externos (fertilizantes e agrotóxicos sintéticos), que incrementam o custo de produção e determina o limiar de lucro da cultura. Dada a esta característica, o cultivo do algodoeiro vem se tornando cada vez mais restrito a uma pequena parcela dos constituintes do sistema produtivo que respondem pela produção em larga escala, já que a adoção destas tecnologias pelos pequenos agricultores, que compõem a maior parte do sistema produtivo do semiárido nordestino, é restringida por fatores econômicos e ambientais.

Entretanto, apesar do volume de produção obtido nas áreas cultivadas por agricultores familiares do semiárido nordestino não se aproximar do grande volume de produção obtido no cerrado brasileiro, a contribuição dada por estes membros do sistema produtivo do algodoeiro não é pequena. Segundo dados do IBGE de 2000, das 17.930.890 pessoas ocupadas em atividades agrícolas no Brasil, 8.210.809 estavam associadas a atividades agrícolas desenvolvidas na região Nordeste, contra apenas 1.018.201 pessoas empregadas em lavouras do Centro-Oeste do Brasil. Essa situação demonstra que a atividade agrícola desenvolvida no Nordeste, funciona como fixadora do homem no campo e, como tal, deve ter as condições

restritivas a sua continuidade minimizadas ou suplantadas, a fim de continuar contribuindo para o desenvolvimento social da região.

Apesar da reconhecida adaptabilidade às condições edafoclimáticas da região, bem como da sua importância econômica e social, a cultura do algodoeiro no nordeste brasileiro ainda não acompanha a produtividade do cerrado. Atualmente, essa situação vem sendo revertida através da adoção de novas tecnologias (FREIRE, 2007), onde o desenvolvimento de cultivares modernos, com elevada exigência por insumos para manifestação de seu máximo potencial produtivo, vem contribuindo para impulsionar a produção do algodoeiro em todo o cerrado brasileiro (FREIRE, 2007). Todavia, considerando que no nordeste brasileiro as condições ambientais e econômicas são bem distintas das verificadas no centro-oeste, toda esta tecnologia não pode ser simplesmente transferida para outra região. Exatamente por isso se verifica a necessidade de voltarmos às pesquisas científicas para o aumento da produtividade do algodão no semiárido brasileiro, sem a elevação dos custos, de forma a garantir a sustentabilidade da cultura e fixar o homem no campo.

O gerenciamento do cultivo do algodoeiro com a determinação de doses adequadas de nutrientes e água à cultura, vem se estabelecendo como um meio adequado para redução dos custos de produção. Assim, o monitoramento de fazendas usando agricultura de precisão vem sendo usado como meio de obtenção de informações precisas e sincronizadas com as necessidades da cultura, sobre a quantidade de água necessária à planta e a definição de doses adequadas de fertilizantes, bem como para aplicação de pesticidas/fungicidas (McKINION et al., 2001). Por sua vez, os estudos que utilizam uma única variável, como por exemplo, o nitrogênio ou déficit hídrico, são limitados para determinação das relações entre a resposta espectral e as condições que alteram a densidade da vegetação. Nesse contexto, o ideal é analisar como cada um dos nutrientes pode alterar a resposta espectral e o comportamento do conjunto deles ligados à influência dos fatores ambientais (REDDY e ZHAO, 2005; FRIDGEN e VARCO, 2004).

Especificamente para o desenvolvimento do algodão em regiões semiáridas, muitos experimentos têm sido conduzidos para avaliação da influência de fatores ambientais e biofísicos nas propriedades ópticas das folhas. Esses sistemas de monitoramento utilizam informações georreferenciadas, dados meteorológicos de superfície, imagens de câmeras e/ou satélites e sensores de campo, bem como poderosos softwares de modelamento matemático e tratamento de imagens, com o objetivo de estimar síncrona e precisamente as quantidades de água e insumos que as plantas necessitam, garantindo ao produtor um nível sustentável de produtividade com redução dos custos de produção (BRANDÃO et al., 2006; McKINION et al., 2001).

Não há dúvidas de que o manejo da fertilidade do solo, envolvendo correção da acidez e adubação é um fator determinante da produtividade do algodoeiro (STAUT e KURIHARA, 2001; SILVA et al., 1995); porém, deve ser feito de maneira criteriosa e equilibrada, levando-se em consideração que o uso do solo deve ser direcionado para a manutenção de sua fertilidade em equilíbrio com o meio ambiente. A recomendação de adubação nitrogenada com base na análise de solo ou foliar é uma tarefa difícil devido à dinâmica desse nutriente no solo; porém, resultados de pesquisa em condições de campo têm demonstrado que é possível relacionar a resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada com a intensidade do uso da área e o potencial de produtividade (SILVA et al., 1995). Para isso, técnicas que possibilitem uma resposta rápida aos produtores tornaram-se objeto de pesquisa como forma de subsidiar a decisão de suplementação da adubação nitrogenada, especialmente por ser esse nutriente um dos maiores responsáveis pelo aumento na produtividade do algodoeiro e ao mesmo tempo oferecer uma resposta espectral bem definida, quando

não há carência de outros nutrientes (READ et al., 2006; BOGGS et al., 2003; ARGENTA et al., 2001; MEDEIROS et al., 1997; GRIMES e EL-ZIK, 1990). Entretanto, na região do semiárido há carência de estudos que relacionem a resposta à adubação nitrogenada com a dose e a resposta espectral do algodoeiro após a adubação. Zhao et al. (2005), avaliando as melhores regiões espectrais e índices de vegetação para determinação dos efeitos da adubação nitrogenada e crescimento de plantas de algodão, identificaram que no manejo da adubação nitrogenada a produtividade do algodão em caroço se manteve num alto índice, mesmo com o uso de doses menores de fertilizantes nitrogenados, e que não havia uma relação de proporcionalidade direta quando da elevação da dose. Os autores verificaram ainda que os melhores comprimentos de onda para precisar a resposta óptica do algodoeiro a adubação nitrogenada situava-se entre 680 até 850 nm.

Como a eficiência agrônômica da adubação não pode ser estudada como um fator isolado, muitas pesquisas correlacionam o uso da adubação nitrogenada, fosfatada e potássica, à disponibilidade d'água e ao manejo do solo. Além disso, práticas de manejo de solo e de adubação, incluindo doses e método de aplicação e a escolha do fertilizante, podem afetar substancialmente a fração do nitrogênio ou potássio aplicado que atinge a superfície da raiz (ANGHINONI, 1985), pois o aproveitamento do N dos fertilizantes pelas plantas é relativamente baixo, chegando, em muitos casos, a menos que 50% (RAO et al., 1992). Já o fósforo é um dos nutrientes aplicado em maiores quantidades nos solos brasileiros, embora seja requerido em menor quantidade que o nitrogênio ou potássio, sendo imprescindível para a obtenção de produções satisfatórias (RAIJ, 1991).

A época de aplicação dos nutrientes também é muito importante nos sistemas de gerenciamento da cultura. O algodoeiro absorve cerca da metade dos nutrientes até a plena floração, sendo que a alta demanda de nutrientes se dá no período entre a emissão dos primeiros botões florais e a formação das primeiras maçãs. Dos nutrientes absorvidos, o fósforo é o elemento que mais se concentra nas partes colhidas (ROSOLEM, 2007). A quantidade de fósforo exportado através das plumas é proporcional à produtividade atingida. Assim, o nutriente deve ser repostado de forma a não limitar a fertilidade do solo e cultivos subsequentes. Sousa et al. (2004) recomendaram no máximo 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para obtenção de elevadas produtividades de algodão no cerrado, se o solo estiver com teor adequado de fósforo. Laca-Buendia e Purcino (1980) constataram que a produção do algodoeiro, cultivado nos Latossolos do norte de Minas Gerais, aumentou linearmente com as doses de fósforo aplicado até 120 kg ha⁻¹. Para as condições do semiárido, ainda não existem trabalhos que definam doses e modos de aplicação de fósforo, bem como sua correlação com as propriedades ópticas da planta, existindo ainda dúvidas sobre a quantidade máxima a ser aplicada em solos com diferentes teores desse nutriente.

Considerando que todo investimento na lavoura é feito de forma a elevar a produtividade sem aumentar os custos de produção, o fornecimento de informações precisas sobre o estado nutricional da cultura e seu crescimento torna-se altamente desejável. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar as condições de crescimento do algodoeiro através de variáveis biofísicas usando técnicas de sensoriamento remoto, por serem não destrutivas e de rápida resposta, auxiliando na decisão sobre suplementação da adubação nitrogenada e fosfatada ainda durante o ciclo da cultura, dispondo informações precisas para o adequado manejo desta cultura nas condições do semiárido, permitindo assim o aumento da produtividade.

1.1. Objetivo Geral

Estimar a produtividade e o estado nutricional do algodoeiro irrigado em relação à fertilização nitrogenada e fosfatada, utilizando variáveis biofísicas obtidas através de técnicas de sensoriamento remoto com dados multiespectrais e de espectrorradiometria de campo.

1.2. Objetivos Específicos:

- Avaliar, em quatro estágios fenológicos distintos, os efeitos da adubação nitrogenada e fosfatada sobre o crescimento, estado nutricional, conteúdo de clorofila e produtividade do algodoeiro.
- Estudar as relações entre a resposta espectral e o estado nutricional do algodoeiro em função da adubação nitrogenada e fosfatada, bem como seus efeitos na produtividade;
- Desenvolver equações preditivas para o índice de área foliar e a produção de fitomassa do algodoeiro, a partir dos índices de vegetação baseados em dados de espectrorradiometria de campo.
- Desenvolver equações preditivas para o índice de área foliar e a produção de fitomassa do algodoeiro, a partir dos índices de vegetação baseados em dados multiespectrais do Mapeador Temático do Landsat 5.
- Determinar a produção da fitomassa total usando dados multiespectrais no cálculo do balanço de energia e da fração evaporativa;
- Analisar a eficiência das metodologias utilizadas para prever em tempo hábil a necessidade de suplementação da fertilização da cultura sem que ocorra redução da produtividade.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Resposta espectral da vegetação

Um método direto para detecção remota dos níveis absolutos de nutrientes nas plantas e solo ainda não foi estabelecido. As respostas espectrais para plantas com deficiência de nutrientes são detectadas usando técnicas de sensoriamento remoto (SR) com grande aceitabilidade, pois algumas deficiências de nutrientes são conhecidas por reduzirem o nível de clorofila das plantas (REICHARDT e TIMM, 2004). Muitos estudos têm avaliado os efeitos da adubação nitrogenada sobre o crescimento e produtividade das culturas e, em especial, para a cultura do algodão, comparando-os com medições da refletância espectral, tanto em banda larga, como estreita (BRONSON et al., 2007; LI et al., 2001; THENKABAIL et al., 2000). A redução no fornecimento de N às plantas induz a redução nos níveis de clorofila, o que pode levar à clorose das plantas de tal forma que, em alguns casos, a resposta espectral das mesmas pode até ser confundida com o solo (PEÑUELAS e FILELLA, 1998).

As propriedades espectrais das folhas é função de sua composição química, morfologia e estrutura interna (REICHARDT e TIMM, 2004). Em estudos usando sensoriamento remoto (SR) para avaliação da cobertura vegetal, as folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores orbitais, sendo então necessário um estudo mais aprofundado das propriedades espectrais no tecido foliar.

As folhas possuem epiderme superior e inferior, onde a camada mais externa é coberta apenas pela cutícula, que é uma fina camada de proteção cuja função é impedir a perda excessiva de água pela planta. Na epiderme inferior encontram-se os estômatos que permitem as trocas de ar, sendo dessa forma, também responsáveis pelo balanço térmico da planta através do controle da umidade (CAMPBELL, 1996).

Logo abaixo da epiderme encontra-se o tecido paliçádico, seguido pelo mesófilo, onde ocorrem as trocas de oxigênio e gás carbônico necessários para a fotossíntese e respiração. É no tecido paliçádico que se encontram os cloroplastos, dentro dos quais são armazenados os pigmentos (clorofilas e carotenóides) responsáveis pela fotossíntese (HOFFER, 1978; CAMPBELL, 1996). As clorofilas são as principais responsáveis pelo processo fotossintético e atuam diretamente na captação da energia eletromagnética, enquanto que os carotenóides são pigmentos auxiliares da fotossíntese e atuam indiretamente aumentando a capacidade da clorofila em converter a radiação eletromagnética em energia química (HOFFER, 1978).

Assim, a concentração e composição de pigmentos presentes nos cloroplastos são importantes fatores, relacionados à eficiência fotossintética em plantas e, conseqüentemente, a seu crescimento e adaptação à ambientes com diferentes luminosidades. (THIELE et al., 1998). Considerando que a clorofila é um forte indicador das condições fisiológicas da cultura e tem forte absorvância na região espectral do vermelho, modelos empíricos para prever a quantidade da clorofila através da refletância espectral, são baseados, em sua maioria, na região do vermelho do

espectro eletromagnético (BROGE e LEBLANC, 2001; BANNARI et al., 1995; JACQUEMOUD e BARET, 1990), pois as clorofilas dão a cor verde às plantas devido à baixa absorção de luz na região do espectro eletromagnético correspondente a esta cor, enquanto apresentam forte absorvância na região espectral do vermelho (BROGE e LEBLANC, 2001). Assim, o teor de clorofila foliar tem sido utilizado como um indicador do estado nutricional das plantas devido ao fato de estar diretamente associado ao potencial da atividade fotossintética. Dessa forma, pode-se prever a necessidade ou não da aplicação de fertilizantes nitrogenados em culturas de interesse agrícola baseando-se no fato de ser o N um dos principais elementos da estrutura molecular da clorofila.

Na faixa do visível do espectro eletromagnético (400-700 nm), são os pigmentos (clorofilas e carotenóides) que dominam a resposta espectral da vegetação (CHAPPELLE et al., 1992), onde no comprimento de onda próximo a 460 nm (faixa do azul no espectro eletromagnético) e em torno de 660 nm (vermelho), ocorre baixa refletância devido a duas bandas de absorção da clorofila, que absorve a maior parte da energia nesses comprimentos de onda. De acordo com Berg et al. (2002), a clorofila *a* apresenta picos máximos de absorção aos 665 e 465 nm, com uma absorvância molar superior a $10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, uma das mais altas em compostos orgânicos. No visível, boa parte da energia que atinge a folha é absorvida, sendo pouca energia transmitida através das folhas. A relativa falta de absorção em torno de 550 nm (verde) permite um pico de reflexão. Assim, quando a planta está sob estresse, e a produção de clorofila é reduzida, as folhas absorvem menos nas bandas de absorção da clorofila e apresentam-se mais avermelhadas ou amareladas (HOFFER, 1978).

A estrutura do mesófilo é responsável pela refletância no infravermelho próximo (700 nm – 1.300 nm), pois a reflexão das folhas nessa faixa não é controlada pelos pigmentos. A refletância aumenta porque as folhas absorvem pouca energia nesta região, onde a água influencia a pouca absorção (HOFFER, 1978). A cutícula e a epiderme são praticamente transparentes à radiação infravermelha. Esta radiação é espalhada no mesófilo e aproximadamente 60% desta energia é refletida e transmitida (CAMPBELL, 1996). Já no infravermelho médio a resposta espectral é fortemente dominada pelas bandas de absorção da água (HOFFER, 1978).

Essas características espectrais da vegetação não são fixas, pois podem mudar de acordo com a cultura estudada, com o estresse ocasionado por doenças, ataque de insetos, variações no teor de umidade, déficits nutricionais ou o efeito da temperatura. As mudanças ocorrem quase simultaneamente tanto na faixa do visível quanto no infravermelho próximo, revelando alterações no vigor ou fitomassa da cultura (CAMPBELL, 1996).

Assim é possível quantificar essas variáveis através das medidas baseadas nos valores digitais dos sensores remotos, verificados na radiância ou na refletância, onde operações matemáticas com esses valores, ou a combinação de alguns deles em diferentes regiões do espectro originam os chamados índices de vegetação, capazes de fornecer informações importantes sobre o estado da vegetação em estudo (BRANDÃO et al., 2008; LIANG, 2004; CAMPBELL, 1996).

Os índices de vegetação foram criados para tentar maximizar as informações espectrais fornecidas pela vegetação, dentro das faixas espectrais que melhor se correlacionam às propriedades das plantas. Esses índices foram comprovados por estudos empíricos, relacionando-os a parâmetros biofísicos da vegetação como índice de área foliar, fitomassa e funções fisiológicas (MYNENI et al., 1997, SELLERS et al., 1996).

Entretanto, como diferentes alvos, ou superfícies naturais, possuem diferentes comportamentos espectrais, tendendo a mascarar o sinal fornecido pela vegetação em medições com sensores remotos, têm sido desenvolvidos diversos índices de vegetação na tentativa de reduzir o efeito da refletância de alguns alvos ou o efeito da atmosfera. Assim, um bom índice de vegetação deve ser sensível a densidade e distribuição das folhas, idade da planta, deficiências minerais, ataque de pragas e doenças (LIANG, 2004) e insensível aos fatores de perturbação, como a refletância do solo ou efeitos atmosféricos (HUETE, 1988; HABOUDANE et al., 2004).

A organização celular dentro da camada mesofilica das folhas e a estrutura do dossel, afetadas simultaneamente pelo status da clorofila e pelo fornecimento de nitrogênio, são, assim, os fatores mais importantes que determinam a refletância da vegetação no infravermelho-próximo (IVP) (KUMAR et al., 2001; MORAN et al., 1995; MORAN et al., 1997). Consequentemente, os índices de vegetação baseados no infravermelho próximo podem ser usados para estimar o status do nitrogênio da cultura, bem como para a determinação do Índice de Área Foliar (IAF) das plantas sob investigação (HABOUDANE et al., 2002).

A absorção de nutrientes está intimamente relacionada às condições climáticas e, principalmente, à fisiologia da planta. Entretanto, não só o nitrogênio, mas outros macronutrientes como o fósforo e o potássio, bem como a água respondem pela eficiência fisiológica de grande parte das culturas, sendo estes elementos os principais responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento do algodoeiro (ROSOLEM, 2000). Uma planta jovem pode apresentar retardamento do crescimento por qualquer deficiência nutricional, de modo que as aplicações subsequentes de nutrientes não têm o mesmo efeito que o verificado em plantas fertilizadas apropriadamente desde o início de sua formação (REICHARDT e TIMM, 2004). De acordo com Marschner (1995) a deficiência de P proporciona redução no crescimento da parte aérea através da limitação do número e da expansão das folhas, ramificação, redução na taxa de assimilação de carbono e da senescência prematura das folhas, limitando assim a futura produção de sementes e/ou fibra. A expansão foliar está diretamente relacionada com a expansão das células epidérmicas e a concentração interna de fósforo no tecido vegetal (MARSCHNER, 1995).

Deficiências no fornecimento de P ao algodoeiro podem resultar em desenvolvimento lento, com necrose de botões florais nas partes mais novas das plantas (ROSOLEM, 2001). Na Figura 1 está relacionada a necessidade de P com os estádios de desenvolvimento do algodoeiro, conforme observado por Rosolem e Bastos (1997).

Em condições de pequeno a moderado estresse de P pode não ocorrer o aparecimento de sintomas detectáveis visualmente, entretanto para deficiências mais severas alguns sintomas tornam-se visíveis, sendo referidos na literatura como: o escurecimento de folhas jovens (CASSMAN, 1993; MENDES, 1959), o avermelhamento do caule (MARCUS-WYNER e RAINS,

1982), e a necrose de botões florais nas partes mais novas das plantas, além de amarelecimento das folhas mais velhas (ROSOLEM e BASTOS, 1997).

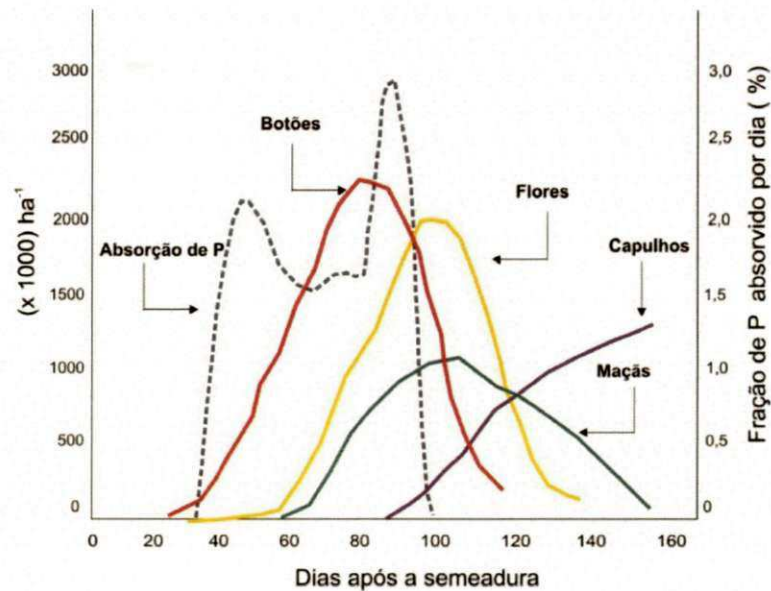


Figura 1. Absorção de fósforo relacionada ao ciclo de crescimento do algodoeiro. Fonte: Adaptado de Rosolem (2001)

Alguns estudos já demonstraram que as concentrações de clorofila foliar e total (C_{ab} a + b ($\mu\text{g cm}^{-2}$)), no algodoeiro são reduzidas quando ocorre deficiência de P (OOSTERHUIS e BERNADEZ, 1997). Dessa forma, também para o fósforo, as condições fisiológicas das plantas podem ser estimadas através das medições das alterações observadas na quantidade de folhas e na pigmentação foliar, indicada pelos níveis de clorofila, e detectáveis através de técnicas de sensoriamento remoto.

Uma das primeiras aplicações de dados de sensoriamento remoto foi a detecção das diferenças relativas na densidade da cobertura vegetal. Os dados da refletância foram relacionados às características da planta tais como a fitomassa ou a fração da radiação ativa fotossinteticamente detectada pela vegetação (WIEGAND et al., 1992). Considerando que as faixas do vermelho e infravermelho-próximo (*Red* e *NIR*, ou *V* e *IVP*) do espectro eletromagnético são particularmente úteis no monitoramento da vegetação, alguns autores constataram que as parcelas do vermelho e do IVP no espectro possuem grande correlação com variáveis da planta como altura, densidade e percentual de cobertura (GUPTA, 1993).

A refletância próxima à região do IVP no espectro eletromagnético é particularmente sensível às mudanças na quantidade de clorofila da folha. Próximo a 700 nm encontra-se o comprimento de onda limite do espectro visível de absorção de clorofila, que é destacado pela curva derivativa da refletância, como pode ser visto na Figura 2. Essa região marca o limite das propriedades óticas exclusivas do tecido da planta e da absorção de clorofila nas faixas espectrais do vermelho (FILELLA e PEÑUELAS, 1994; CARTER, 1993; CURRAN et al., 1991; EVERITT et al., 1985).

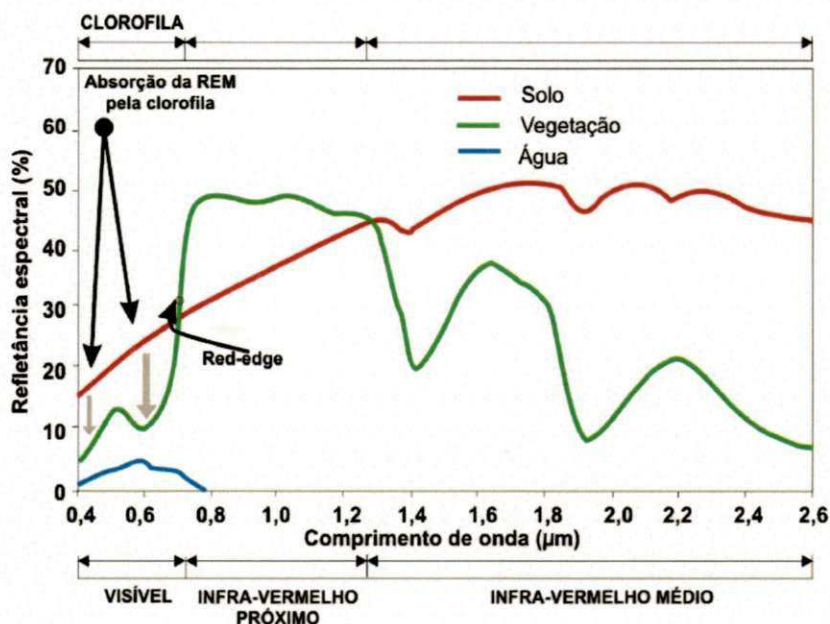


Figura 2. Curva característica da refletância da vegetação verde, apresentando a faixa espectral de absorção da clorofila. Adaptado Lillesand e Kiefer (1987).

Assim, considerando o fato de que diversas deficiências de nutrientes são reconhecidas como redutoras dos níveis de clorofila da planta, algumas pesquisas têm se concentrado na definição das melhores faixas espectrais para determinação dessas deficiências. Haboudane et al. (2004), estudando os teores foliares de N e níveis de clorofila para três culturas distintas (milho, trigo e soja), verificaram que a refletância próxima a 550 nm é sensível ao teor foliar de N (BARET e GUYOT, 1991). Outras faixas espectrais de considerável interesse são as regiões do vermelho (~670 a 680 nm), de grande absorbância pela clorofila, e os comprimentos de onda no infravermelho próximo (~780 a 800 nm), que são altamente refletivos (ZARCO-TEJADA et al., 2004; HABOUDANE et al., 2004; STONE et al., 1997; THOMAS e GAUSMAN, 1977).

A Figura 2 apresenta a região do espectro eletromagnético onde há uma rápida elevação da refletância da vegetação, frequentemente referenciada como "*red-edge*". Alguns pesquisadores comprovaram que o *red-edge* é ligeiramente deslocado à medida que a taxa de clorofila aumenta, enquanto que outros relacionaram medidas nesta região espectral com a concentração da clorofila em folhas de várias espécies (DAUGHTRY et al., 2000; THOMAS e GAUSMAN, 1977). Os índices de vegetação baseados na refletância do vermelho e do NIR estão sendo usados também para dedução das taxas da aplicação de fertilizantes em diversas culturas (STONE et al., 1997).

Durante as últimas décadas, esforços substanciais foram investidos na tentativa de melhorar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e em desenvolver novos índices objetivando compensar as influências do solo (RONDEAUX et al., 1996; BANNARI et al., 1995; QI et al., 2000; QI et al., 1994; BARET et al., 1989; HUETE, 1988) bem como, os efeitos atmosféricos (KAUFMAN e TANRE, 1992). Embora nesses estudos os fatores de perturbação externos relacionados às mudanças no brilho do solo e as condições atmosféricas sejam

considerados, os índices de vegetação definitivamente ainda têm limitações intrínsecas, pois eles não são medições exclusivas de uma variável específica de interesse, tal como a quantidade de clorofila, a geometria da planta, ou a arquitetura do dossel. Até agora, não foi possível projetar um índice que fosse sensível somente à variável desejada e totalmente insensível a todos os parâmetros restantes da vegetação.

Diferentes índices foram definidos para diferentes finalidades e otimizados para avaliar um processo de interesse. Por exemplo, alguns índices espectrais foram propostos para capturar os processos fotoquímicos associados com a atividade da fotossíntese tal como o *uso da eficiência da luz* (ϵ) ou estimar o conteúdo de pigmentação da folha (clorofila) (HABOUDANE et al., 2002; DAUGHTRY et al., 2000; GAMON et al., 1992), enquanto que outros foram projetados para obter o IAF.

A grande utilização destes índices advém do fato de que a refletância do dossel, no visível e infravermelho próximo, é fortemente dependente das propriedades estruturais (por exemplo, IAF) e bioquímicas (por exemplo, clorofila) do dossel (ZARCO-TEJADA et al., 2001; JACQUEMOUD et al., 2000; GOEL, 1988). Além disso, o IAF e o índice de clorofila têm efeitos similares na refletância do dossel, particularmente na região espectral do verde e no infravermelho. Para desvincular esse efeito combinado, estudos recentes (HABOUDANE et al., 2002; DAUGHTRY et al., 2000) demonstraram que a quantidade de clorofila da folha pode ser estimada com efeitos mínimos de confusão devido ao IAF através de uma combinação de dois tipos de índices espectrais: índices sensíveis à concentração do pigmento (clorofila) e índices imunes à influência das propriedades óticas do solo. Inversamente, nenhum estudo tem sido focado na recuperação do IAF sem a interferência dos efeitos da clorofila. Esse último gera uma dispersão considerável na relação entre IAF e o índice da vegetação escolhido. Alguns desses IVs serão testados nesse trabalho e são apresentados abaixo.

Alguns estudos foram realizados para avaliar e comparar vários índices da vegetação em termos de sua estabilidade e de seu poder de predição de IAF (BARET e GUYOT, 1991), enquanto outros tratam de modificar alguns índices da vegetação para aumentar sua sensibilidade, bem como melhorar sua linearidade com o IAF. Conseqüentemente, alguns índices foram identificados como os melhores para estimar o IAF porque são menos sensíveis à variação dos parâmetros externos que afetam a refletância espectral do dossel como as propriedades óticas do solo, a geometria da iluminação, e as condições atmosféricas. Entretanto, o efeito das variações da clorofila da folha na relação entre o Índice de vegetação e o IAF ainda é um problema em estudo, mas sem uma solução definitiva. É importante entender como a concentração da clorofila influencia o comportamento de um índice de vegetação, e qual índice é mais apropriado à predição de IAF, sendo menos sensível às mudanças de clorofila e estimando a produtividade da cultura com o menor erro possível.

A escolha do melhor índice de vegetação não é só determinada por sua característica para estimativa das propriedades biofísicas e bioquímicas da cultura. De fato, uma das principais variáveis é a disponibilidade dos dados de refletância. Muitos estudos para avaliação do desempenho dos índices espectrais têm tratado das relações entre índices de banda larga e

estreita na determinação das características biofísicas da cultura. A possibilidade de fornecimento de dados hiperespectrais para determinação de parâmetros biofísicos se deparam com a dificuldade de gerenciamento de uma enorme quantidade de dados, gerando dificuldades de armazenamento, largura de faixa para recepção dos dados em tempo real, conversão de dados e especialmente a aplicação de métodos convencionais de classificação de dados em um número muito grande de bandas espectrais. Dessa forma, alguns autores compararam a eficiência de índices obtidos de dados de faixas larga e estreita na determinação das características biofísicas e bioquímicas de várias culturas (THENKABAIL et al., 2000; HUETE et al., 1997), os quais observaram que índices espectrais de faixa estreita poderiam ser adaptados para as bandas largas dos sensores de satélites como Landsat 5 TM (Thematic Mapper), SPOT (Systeme por l'observation de la terre) ou IRS (Indian Remote Sensing), sem uma perda significativa de informação. A introdução de faixas espectrais diferenciadas nos índices já conhecidos foi avaliada por Thenkabail (2004), constatando que a adequação de índices de faixa larga com a introdução de bandas espectrais na faixa do azul e do verde fornecia valores de IAF próximos de outros 16 índices de faixa estreita, com diferenças inferiores a 10% para os valores de R^2 , em várias culturas estudadas. Analogamente, outros autores testaram vários índices de vegetação para determinação da clorofila foliar, fitomassa e produtividade do algodão, verificando que alguns IVs adaptados para banda larga possuem desempenho similar aos de banda estreita (ZHAO et al., 2007; BROGE e LEBLANC, 2001; THENKABAIL et al., 2000). Assim, o primeiro desafio para determinação da fitomassa através da refletância da vegetação é a determinação do IV mais apropriado para estimativa do IAF, que auxiliará na avaliação do estado nutricional da cultura em estudo.

2.1.1 Índices baseados na diferença normalizada: melhoramento da linearidade

2.1.1.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O índice de vegetação mais conhecido e amplamente usado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que foi desenvolvido por Rouse et al. (1974), e usado por Tucker (1979), com o objetivo de amenizar a interferência do solo, a influência atmosférica e as variações zenitais do sol. Apesar de sua característica de saturação em casos de vegetação com alta densidade e em multicamadas, esse índice é muito útil para a estimativa da quantidade de água na folha e para o cálculo do índice de área foliar, além de outros parâmetros biofísicos (TUCKER, 1979). Ele é baseado na diferença entre a absorção máxima no vermelho, devido aos pigmentos de clorofila, e à reflexão máxima no infravermelho causado pela estrutura celular da folha. Sendo R_x a refletância num dado comprimento de onda (nm), este índice é obtido pela seguinte equação:

$$NDVI = \left[\frac{(R_{IVP} - R_V)}{(R_{IVP} + R_V)} \right] \quad (1)$$

onde: R_{IVP} é a refletância no infravermelho próximo e R_V é a refletância na região do vermelho.

O NDVI é simples e pode ser efetivo na predição de propriedades da superfície quando a copa da vegetação não é muito densa. Se a cobertura vegetada não for bem adensada, a refletância do solo interferirá no NDVI, como pode ser visto na Figura 2. Por outro lado, se a copa for muito densa, com muitas camadas de vegetação, a refletância no vermelho não altera muito, mas, no infravermelho próximo continua a aumentar, saturando o NDVI (LIANG, 2004). Dessa forma, esse índice pode tornar-se insensível, ou saturado, para valores de IAF acima de 3 a 4, que é um valor baixo se considerado a média global das florestas tropicais.

2.1.1.2 Índice de Vegetação por Diferença Renormalizada (RDVI)

Apesar do seu uso intensivo, o NDVI satura nos casos onde o dossel é denso e em multicamadas, mostrando uma relação não-linear com parâmetros biofísicos, tais como o IAF (BARET e GUYOT, 1991). Dessa forma, os índices *Renormalized Difference Vegetation Index* (RDVI) e o *Modified Simple Ratio* (MSR), foram desenvolvidos a fim de tornar sua relação linear com variáveis biofísicas da vegetação. O RDVI, apresentado na Eq. (2), foi proposto para combinar as vantagens do DVI (*Difference Vegetation Index*), sendo dado pela diferença entre a refletância do infravermelho próximo (IVP) e do Vermelho (V), e o NDVI (ROUJEAN e BREON, 1995).

$$RDVI = \left[\frac{(R_{IVP} - R_V)}{(\sqrt{R_{IVP} + R_V})} \right] \quad (2)$$

2.1.1.3 Índice de Vegetação Transformado (TVI)

Para melhorar o NDVI, retirando os valores negativos e aumentando sua sensibilidade à fitomassa, Rouse et al. (1974) também desenvolveram o *Transformed Vegetation Index* (TVI). Esse índice tem sido usado frequentemente para discriminação de vários tipos de vegetação, sendo muito útil na confecção de mapas de vegetação e densidade de plantas (D'AGNESE et al., 1996; HUETE e JACKSON, 1987). Esse índice é dado por:

$$TVI = \left[\frac{(R_{IVP} - R_V)}{(R_{IVP} + R_V)} + 0,5 \right]^{1/2} \quad (3)$$

2.1.2 Índices de vegetação baseados nos efeitos do solo

2.1.2.1 Índice de Vegetação Ajustado aos Efeitos do Solo (SAVI)

Para minimizar a influência das propriedades óticas do solo na refletância da vegetação, o índice de vegetação comumente usado é SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), desenvolvido por Huete (1988), que inclui um fator de ajuste para a influência do solo no dossel, L. O SAVI é dado por:

$$SAVI = \left[\frac{(1+L)(R_{NIR} - R_v)}{(R_{NIR} + R_r + L)} \right] \quad (4)$$

O fator L é uma função da densidade da vegetação, e sua determinação requer um conhecimento prévio das quantidades da vegetação existentes no local (HUETE, 1988). Este fator é crítico na minimização de efeitos das propriedades óticas do solo na refletância da vegetação, sendo esse um coeficiente que varia com as diferenças na atenuação da refletância do solo através da cobertura vegetada entre o vermelho e o infravermelho próximo. Seus valores variam entre 0 a 1 para coberturas de alta e baixa densidade, respectivamente. Se L for igual a zero, o SAVI torna-se equivalente ao NDVI, enquanto que tendendo a 1, torna-se equivalente ao PVI (as isolinhas da vegetação são paralelas) (BARET e GUYOT, 1991). Huete (1988), baseado em uma simplificação da equação de transferência radiativa, mostra que um valor de L = 0.5 permite o melhor ajuste, minimizando os efeitos de espalhamento secundário.

2.1.2.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI)

Tentando melhorar o SAVI no que diz respeito às diferenças na influência do solo, Qi et al. (1994) desenvolveram um SAVI modificado, MSAVI (*Modified Soil-Adjusted Vegetation Index*) com um fator de ajuste L que não aparece na formulação do MSAVI. Usando faixas hiperespectrais, o MSAVI é calculado como (Qi et al., 1994):

$$MSAVI = \frac{1}{2} \left[2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_v)} \right] \quad (5)$$

Em um estudo de Broge e Leblanc (2001), onde foram usados modelos de transferência radiativa, o MSAVI apresentou-se como o melhor índice para estimativa do índice de área foliar com relação à sensibilidade aos efeitos do dossel, além de sua característica de redução dos efeitos das propriedades espectrais do solo. Noutros estudos ele apresentou-se também como o melhor preditor para o índice de área foliar em cobertura vegetal densa, e seus variantes mostraram-se apropriados para detecção dos teores foliares de nitrogênio em plantas de algodão (ZHAO et al., 2005; BROGE e LEBLANC, 2001).

2.1.3 Índices de vegetação baseados em três faixas espectrais – melhoramento do efeito da clorofila nas folhas

2.1.3.1 Índice de Vegetação Triangular Modificado (MTVI2)

Os índices que incorporam faixas no verde e partes do vermelho (*red-edge*) do espectro solar foram desenvolvidos para medir a absorção de luz pela clorofila na região do vermelho (~670 nm), tendo sido estudadas as relações (R_{700}/R_{670}), (R_{750}/R_{550}) e (R_{750}/R_{700}), introduzidas para minimizar os efeitos conjuntos da refletância intrínseca do solo e dos materiais não-fotossintéticos do dossel, tendo sido obtidas altas correlações entre a concentração da clorofila na folha e essas relações nas faixas de 550, 670 e 700 nm.

Inspirados pela idéia geral do CARI (*Chlorophyll Absorption Ratio Index*), que mede a profundidade de absorção da clorofila em 670 nm, com relação ao pico da refletância no verde (em 550 nm) e a refletância em 700 nm, Broge e Leblanc (2001) desenvolveram o *Triangular Vegetation Index* (TVI_x), projetado para caracterizar a energia radiante absorvida por pigmentos foliares em termos da diferença relativa entre a refletância no vermelho e no infravermelho próximo, conjuntamente com o valor da refletância na região do verde. O TVI_x é determinado como a área definida pelo pico verde, pela região inicial do infravermelho próximo (*red-edge*), e pela refletância mínima na região do vermelho. É formulado como (BROGE e LEBLANC, 2001):

$$TVI_x = 0,5[120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})] \quad (6)$$

O TVI_x baseia-se na premissa de que a área total do triângulo (verde, vermelho, infravermelho) aumentará em consequência da absorção da clorofila (diminuição da refletância no vermelho) e a abundância do tecido foliar (aumento da refletância no infravermelho próximo) (BROGE e LEBLANC, 2001). É importante observar que o aumento da concentração da clorofila também resulta na diminuição da refletância na região do verde, levando, conseqüentemente, a uma diminuição relativa da área do triângulo. Além disso, embora não haja nenhuma absorção de clorofila além de 700 nm, os efeitos indiretos da clorofila na curva da refletância da vegetação são observáveis em torno do limiar da região do vermelho 750 nm. De fato, com aumento nos índices de clorofila, sua característica de absorção espalha-se e causa o deslocamento no vermelho (*red-shift* do *red-edge*). Conseqüentemente, a refletância do dossel em 750 nm é influenciada ainda pelo conteúdo da clorofila na folha. Assim, Haboudane et al. (2004) alteraram o TVI_x, substituindo a refletância em 750nm pela refletância em 800 nm, que é influenciada pelas alterações estruturais do dossel e é insensível a mudanças nos teores de pigmentos, criando o MTVI2 (*Second Modified Triangular Vegetation Index*), que também traz um fator de redução dos efeitos de contaminação do solo, a exemplo do criado por Huete (1988). Esse índice é dado por (HABOUDANE et al., 2004):

$$MTVI2 = \frac{1,5[1,0(R_{800} - R_{550}) - 2,5(R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{[(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670}}) - 0,5]}} \quad (7)$$

2.1.4 Quantificação da clorofila nas folhas

A concentração e composição de pigmentos presentes nos cloroplastos são importantes fatores, relacionados à eficiência do processo fotossintético, no qual a luz é absorvida pelos pigmentos que ao serem excitados, transferem energia para os centros de reação dos fotossistemas I e II, (em 680 e 700 nm, respectivamente) (THIELE et al., 1998; YOUNG e FRANK, 1996). Quando ocorre excesso de energia, esta pode ser dissipada na forma de fluorescência (KRAUSE e WINTER, 1996). Assim, uma das formas de monitoramento da inibição ou redução na transferência de elétrons entre os fotossistemas da planta sob estresse que pode ser observada nas folhas é a fluorescência da clorofila (MAXWELL e JOHNSON, 2000), onde a redução na dissipação da energia pelo processo fotoquímico é refletida por incremento correspondente na fluorescência.

A análise da fluorescência da clorofila a vem sendo largamente utilizada no entendimento dos mecanismos da fotossíntese propriamente dito, bem como na avaliação da capacidade fotossintética alterada por estresses bióticos ou abióticos pelos quais as plantas possam passar. Para esse tipo de avaliação são utilizados fluorômetros de luz modulada (SCHREIBER et al., 1998), cujas aplicações variam desde a rápida identificação de injúrias causadas ao aparelho fotossintético, mesmo quando o sintoma ainda não é visível, até a análise detalhada da alteração da capacidade fotossintética da planta. Uma das grandes vantagens do uso deste método é o fato da medição não ser destrutiva, sendo possível de se realizar tanto em laboratório quanto em campo. Técnicas destrutivas são tradicionalmente utilizadas para a determinação do teor de clorofila em folhas de plantas. Em geral, os métodos destrutivos utilizam vários protocolos laboriosos, com elevado consumo de reagentes químicos, de espaço físico e de mão-de-obra (TUCKER, 1979). Esses métodos utilizam solventes orgânicos que incluem acetona, dimetilsulfóxido (DMSO) (BARNES et al., 1992; HISCOX e ISRAELSTAM, 1979), metanol, N, N-dimetil formamida e éter de petróleo (INSKEEP e BLOOM, 1985; LICHTENTHALER e WELLBURN, 1983; MORAN, 1982; MORAN e PORATH, 1980). Durante a extração e diluição, podem ocorrer significativas perdas de pigmentos, ocasionando elevada variabilidade nos dados. Shoaf e Lium (1976) utilizaram DMSO para modificar a metodologia de extração e eliminar o estágio de centrifugação. O método permitiu aumentar o período de armazenamento dos pigmentos extraídos, de modo a permitir que as análises espectrofotométricas não necessitem ser efetuadas imediatamente após a extração.

O teor de clorofila e carotenóides nas folhas também indica o nível de dano que determinado estresse pode estar causando à planta, já que a clorose é, normalmente, um dos primeiros sintomas expressos. Uma das técnicas destrutivas reconhecidas mundialmente e utilizadas para quantificação dos teores de clorofila foliar é com a utilização do solvente orgânico DMSO (HISCOX e ISRAELSTAM, 1979), onde são extraídos discos das folhas para determinação do teor de pigmentos fotossintéticos. Os discos foliares em geral são fatiados e imersos no DMSO, de onde são realizadas as leituras em espectrofotômetro nas absorvâncias de 470, 646 e 663 nm,

após um período de repouso. De acordo com o procedimento descrito por Wellburn (1994), as equações para determinar o conteúdo dos pigmentos fotossintéticos, fornecidos em ($\mu\text{g mL}^{-1}$) são:

$$\text{Clorofil}_a = [12,19A_{663} - 3,458A_{646}] \quad (8)$$

$$\text{Clorofil}_b = [21,99A_{646} - 5,32A_{663}] \quad (9)$$

$$\text{Clorofil}_{\text{total}} = [(1000 \cdot A_{470}) - 2,14 \cdot \text{Clorofil}_a - 70,16 \cdot \text{Clorofil}_b] / 220 \quad (10)$$

onde A_x é a absorbância no comprimento de onda x (nm).

2.1.4.1 Quantificação da clorofila através de clorofilômetro

Clorofilômetros, ou medidores de clorofila portáteis, têm sido bastante empregados na agricultura de precisão para estimar rapidamente o conteúdo de clorofila nas folhas. Esses equipamentos possuem diodos que emitem luz em dois comprimentos de onda, que se situam nas regiões do vermelho, próxima a 650 nm, e na região do infravermelho próximo a 940 nm. A escolha do comprimento de onda em 650 nm deve-se ao fato que os comprimentos de ondas primários, associados à atividade da clorofila, são 646 e 663 nm. Já o comprimento de onda de 940 nm serve para compensar fatores externos como o conteúdo de água ou diferenças na espessura da folha que venham a interferir na transmitância da luz (WASKOM, 1996).

A luz que passa através da amostra foliar atinge um fotodiodo que a converte em sinais elétricos e são posteriormente amplificados e convertidos para sinais digitais (MINOLTA CAMERA Co. Ltd, 1989). Assim, os valores obtidos são proporcionais aos teores de clorofila foliar e são chamados de índice do clorofilômetro (ARGENTA et al., 2001). O medidor de clorofila SPAD-502 é utilizado na quantificação da clorofila, caracterizando-se pela rapidez e simplicidade, possibilitando uma avaliação não destrutiva do tecido foliar, com correlação direta aos teores de nitrogênio, tendo seus valores chamados de índice SPAD.

2.2. Parâmetros Biofísicos e suas Relações com a Nutrição da Planta

Os ciclos da vegetação estão relacionados a processos biogeoquímicos envolvendo trocas de gases, e processos biogeofísicos envolvendo as trocas de água e energia (SELLERS, 1987). A presença de uma copa fotossinteticamente ativa altera os processos de troca, sendo necessário um monitoramento da distribuição, dos tipos de vegetação e conhecimento das suas propriedades biofísicas e suas variações temporais e espaciais (HUETE et al., 1997).

A avaliação do teor foliar de fósforo (P) e nitrogênio (N), por meio de técnicas de sensoriamento remoto (SR), é útil para a observação das variações espacial e temporal destes nutrientes.

Embora o verde da folha seja discernível a olho nu, a refletância na região visível do espectro eletromagnético geralmente não está relacionada especificamente a um único nutriente. As dificuldades em diagnosticar deficiências específicas com SR são encontradas quando múltiplas deficiências nutricionais estão presentes. Entretanto, as características da refletância espectral de plantas saudáveis ou não, em vários estágios do crescimento, podem ajudar a identificar estresses nutricionais específicos em condições onde outros fatores ambientais são controlados. Deficiências de N e P influenciam na coloração da folha, bem como na eficiência fisiológica do algodão (BRONSON et al., 2005; READ et al., 2006).

Geralmente, em plantas com deficiências de N observa-se redução na produção de fitomassa e senescência prematura, evidenciado pelo amarelamento ou clorose das folhas mais velhas, uma vez que a disponibilidade do N está bem correlacionada com a concentração total de clorofila nas folhas. Assim, mudanças no status fisiológico das plantas podem ser estimadas através de medidas na pigmentação da folha (por exemplo, clorofila *a*, clorofila *b*, etc.) (TARPLEY et al., 2000; GAUSMAN, 1982).

As principais propriedades da vegetação que interferem nos processos de troca são: a cobertura, o índice da área foliar (IAF), a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel da vegetação (FAPAR), a rugosidade e o albedo (SELLERS et al., 1996; KNYAZIKHIN et al., 1998). O IAF e FAPAR são variáveis biofísicas que descrevem a estrutura da copa e relacionam-se com as taxas de processos funcionais de troca de energia e massa (MYNENI et al., 2002), sendo parâmetros chave em modelos de produtividade global e modelos globais do clima, hidrologia, biogeoquímica e ecologia (SELLERS et al., 1997).

2.2.1 Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FAPAR)

A radiação solar que é utilizada na fotossíntese e na produção primária, encontra-se no intervalo de comprimento de onda de aproximadamente 400 a 700 nm (cerca de 48% da radiação proveniente do Sol). A captura e utilização dessa radiação fotossinteticamente ativa ou PAR

("Photosynthetically Active Radiation") representa a fundamentação energética da origem, evolução e existência sustentável da biosfera (DYE e GOWARD, 1993).

A FPAR ("*Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by a plant canopy*", ou ainda f_{PAR}), é definida como a fração da radiação solar disponível para o processo fotossintético que é efetivamente absorvida pela copa dos vegetais verdes (que possuem a clorofila como pigmento predominante). Ela tem o papel de fonte de energia durante o processo fotossintético do vegetal e pode ser usada como um indicador da presença e estado da cobertura vegetal ou como uma estimativa (quantitativa) de um dos principais fatores que controlam a produtividade desta cobertura. Depende da arquitetura e sistema ótico do dossel, da refletância do solo e da radiação incidente, que varia diariamente (ZHANG et al., 2000; GOWARD, 1992).

A f_{PAR} é um parâmetro chave em modelos de crescimento que se baseiam na radiação utilizada pela vegetação para a produção de fitomassa (OVIEDO et al., 2001), estando relacionada à taxa de assimilação de carbono ou fotossíntese bruta em adição aos fluxos de radiação, calor e umidade (SELLERS et al., 1996). Ela mede a proporção da radiação disponível em comprimentos de onda fotossinteticamente ativos (400 a 700 nm) que a copa absorve, caracterizando o padrão de funcionamento da vegetação e a capacidade de absorver energia, podendo ser utilizada como estimador dos processos de fotossíntese e transpiração do dossel.

Algumas relações entre f_{PAR} e a APAR (*Available Photosynthetically Active Radiation*) têm sido estabelecidas por vários autores (CHOUDHURY, 1987; CHRISTENSEN e GOUDRIAAN, 1993). Em geral, a diferença entre FPAR e APAR é pequena quando a cobertura da vegetação é boa, com uma diferença máxima não ultrapassando 5% (DRAUGHTRY et al., 1992). Além disso, algumas equações foram obtidas relacionando a FPAR ou APAR com a resposta espectral de diversas culturas, através de índices de vegetação nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo com excelente precisão e R^2 relatado como acima de 0,88 (HABOUDANE et al., 2004; DRAUGHTRY et al., 1992). Enquanto a f_{PAR} (fração interceptada da PAR), está diretamente relacionada à quantidade de fitomassa, a APAR apresenta-se como um melhor indicador dos processos fotossintéticos da cultura, devido à absorção da radiação que também é refletida por outros alvos, como o solo, por exemplo, sendo um melhor indicador do IAF (MONTHEITH, 1972). Algumas técnicas vêm sendo usadas para relacionar a f_{PAR} e o IAF a outros parâmetros biofísicos da vegetação usando dados de sensoriamento remoto. Essas relações estão sendo estudadas e variam em função da cor do solo, de efeitos atmosféricos e da umidade. (HABOUDANE et al., 2004; HABOUDANE et al., 2002; RONDEAUX et al., 1996).

Medidas de satélite fornecem os meios para estimativa da radiação de onda curta incidente (R_{s1}), que por sua vez fornece a fração da radiação de onda curta incidente diária (f_{PAR}). Existem relações entre essa fração e os IVs, que combinam a refletância do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, e outras equações relacionam f_{PAR} com o IAF. Apesar dessa fração, dada como $f = APAR/PAR$ manter uma relação não linear com o IAF, alguns autores apresentaram aproximações lineares de f , derivadas matematicamente das refletâncias nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, como apresentado na

Figura 3 (BRADFORD et al., 2005; THENKABAIL, 2004; ROUJEAN e BREON, 1995; GOWER et al., 1999; CHRISTENSEN e GOUDRIAAN, 1993; CHOUDHURY, 1987).

Estudos recentes têm comparado índices de vegetação obtidos com dados multi-espectrais e hiperespectrais e suas capacidades de estimar variáveis agrônômicas. Embora os IVs de banda estreita apresentem uma maior correlação com essas características, alguns índices de banda larga apresentam resultados muito bons, com diferenças nunca superiores a 8% (ZHAO et al., 2007; LIU et al., 2007; THENKABAIL et al., 2000; SERRANO et al., 2000), enquanto outras pesquisas não apresentaram diferenças entre eles (BROGE et al., 2001).

Considerando o fato de que parâmetros como a FPAR, a radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$), os IVs, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento podem variar de pixel a pixel na área estudada, é necessário um algoritmo que considere as variações instantâneas dessas variáveis.

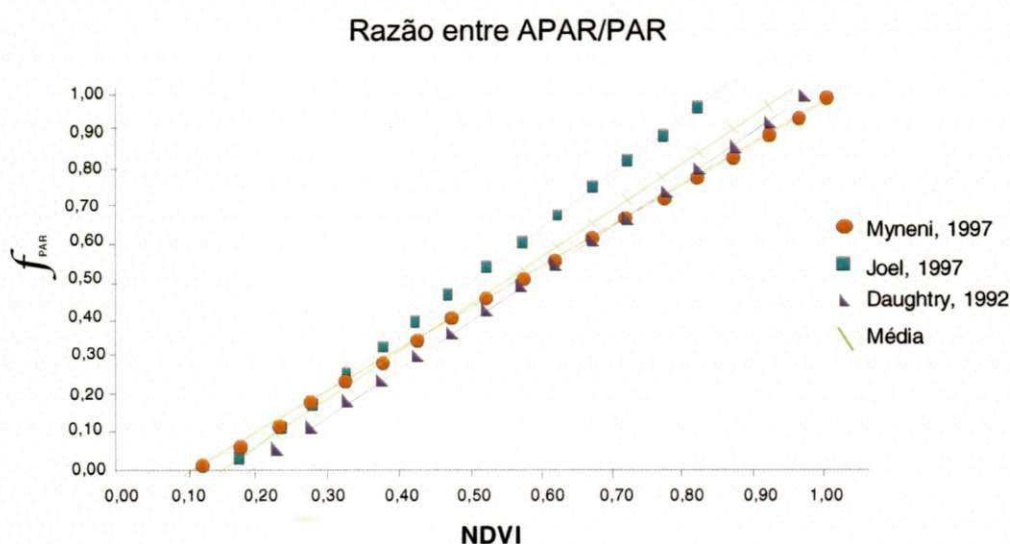


Figura 3. Razão entre a APAR e PAR como função do NDVI, obtidas por diversos autores. Adaptado de: GOWER et al., 1999; MYNENI et al., 1997; JOEL et al., 1997; DAUGHTRY et al., 1992.

2.2.2. Balanço de radiação e PAR

Estimativas da $R_{s\downarrow}$ podem ser obtidas, considerando o seu cálculo em função do ângulo de incidência solar, da distância relativa Terra-Sol e da transmissividade atmosférica. Pela Lei de Planck, a radiação emitida por um corpo varia de acordo com o comprimento de onda e a temperatura do mesmo, e assim pode ser usada uma plataforma de parametrização para determinação da radiação de onda curta incidente para cada banda do satélite, pixel a pixel. Esta plataforma de parametrização conhecida como SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for*

Land), foi desenvolvida por Bastiaansen (1995). Neste algoritmo é obtida a evapotranspiração como um resíduo do balanço de energia à superfície. Ele vem sendo amplamente utilizado em vários países, incluindo Espanha, Itália, Turquia, Paquistão, Índia, Sri Lanka, Egito, Nigéria, China, Estados Unidos da América e Brasil (ZHAO et al., 2007; BASTIAANSEN e ALI, 2003; McKINION et al., 2001). Para seu processamento faz-se necessário o uso de dados coletados via satélite, cujos sensores ofereçam informações no espectro eletromagnético visível, infravermelho próximo e termal, bem como alguns dados complementares coletados à superfície, através de uma estação meteorológica. A necessidade de poucos dados de superfície é uma das principais vantagens do SEBAL (TREZZA, 2005; BASTIAANSEN, 1995).

A Radiação Líquida (R_n), pode ser entendida como a quantidade de energia radiante que se encontra disponível na superfície. De fato, ela traduz todo o balanço de energia radiativa eletromagnética, pois é a diferença entre a radiação que chega e a que se dissipa, sendo dada por (ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN, 2000) :

$$R_n = R_{s\downarrow}(1-\alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (11)$$

em que: $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$),

α é o albedo da superfície (adimensional),

$R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$),

$R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente ($W m^{-2}$), e

ε_0 é a emissividade termal da superfície (adimensional).

No modelo Sebal, a radiação de onda curta incidente, $R_{s\downarrow}$ ($W m^{-2}$), para condições de céu claro é calculada de acordo com a seguinte equação (BRANDÃO et al., 2005; ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN, 2000):

$$R_{s\downarrow} = G_{SC} \cdot \cos\theta \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (12)$$

onde: G_{SC} é a constante solar ($1.367 (W m^{-2})$);

θ é o ângulo de incidência solar;

d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, e

τ_{sw} é a transmitância atmosférica.

O inverso do quadrado da distância relativa Terra – Sol – d_r , em unidades astronômicas, é dado por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left[DOY \frac{2\pi}{365} \right] \quad (13)$$

onde DOY é o dia Juliano e o argumento da função cosseno está em radianos.

A transmissividade atmosférica, τ_{sw} , pode ser obtida segundo expressão proposta por Allen et al. (2002):

$$\tau_{sw} = 0.75 + (2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \quad (14)$$

onde z representa a altitude local.

Os valores de R_{sw} variam de 200 a 1100 ($W m^{-2}$), dependendo do horário e localização da imagem (ALLEN et al., 2002). A radiação de onda curta incidente, juntamente com a temperatura de superfície (T_s (°C)), o albedo de superfície α , e os índices de vegetação são usados na determinação do Saldo de Radiação, ou Radiação Líquida - R_n ($W m^{-2}$) e no Fluxo de Calor no Solo (G ($W m^{-2}$)), conforme apresentado no Apêndice A.

Por sua vez, a radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície - $R_{L\downarrow}$ ($W m^{-2}$) foi obtida através da equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (15)$$

onde: σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$),

T_{ar} é a temperatura do ar (K), e

ε_{atm} é a emissividade atmosférica dada como (ALLEN et al., 2002):

$$\varepsilon_{atm} = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}.$$

A densidade de fluxo de calor no solo (G), fornecida em ($W m^{-2}$), pode se obtida de acordo com Bastiaanssen (2000), representando valores para meio-dia:

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038 \cdot \alpha + 0,0074 \alpha^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (16)$$

em que: T_s é a temperatura de superfície (°C),

α o albedo de superfície, $NDVI$ o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada e

R_n a Radiação Líquida ou Saldo de Radiação ($W m^{-2}$).

O Fluxo de Calor Sensível (H) é a taxa de armazenamento de calor transferido da superfície para o ar através dos processos de convecção ou condução. O mesmo pode ser calculado utilizando-se a equação do transporte de calor, fornecido em ($W m^{-2}$), e dado por:

$$H = \left[\frac{(\rho \cdot c_p \cdot dT)}{r_{ah}} \right] \quad (17)$$

em que: ρ é a densidade do ar úmido, ($kg m^{-3}$);

c_p é o calor específico do ar à pressão constante, ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$);

dT (K) é a diferença de temperatura entre a superfície e um nível de referência e

r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$).

O fluxo de calor sensível é uma função do gradiente de temperatura, rugosidade da superfície e velocidade do vento. Para a sua obtenção com o SEBAL, faz-se necessário o conhecimento da velocidade do vento e das componentes R_n e G em dois pixels *âncoras* para se determinar a variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}).

O processo de obtenção de R_n à superfície é apresentado no esquema da Figura 4, adaptado de Allen et al. (2002). Os detalhes para determinação dos componentes da R_n , podem ser vistos no Apêndice A.

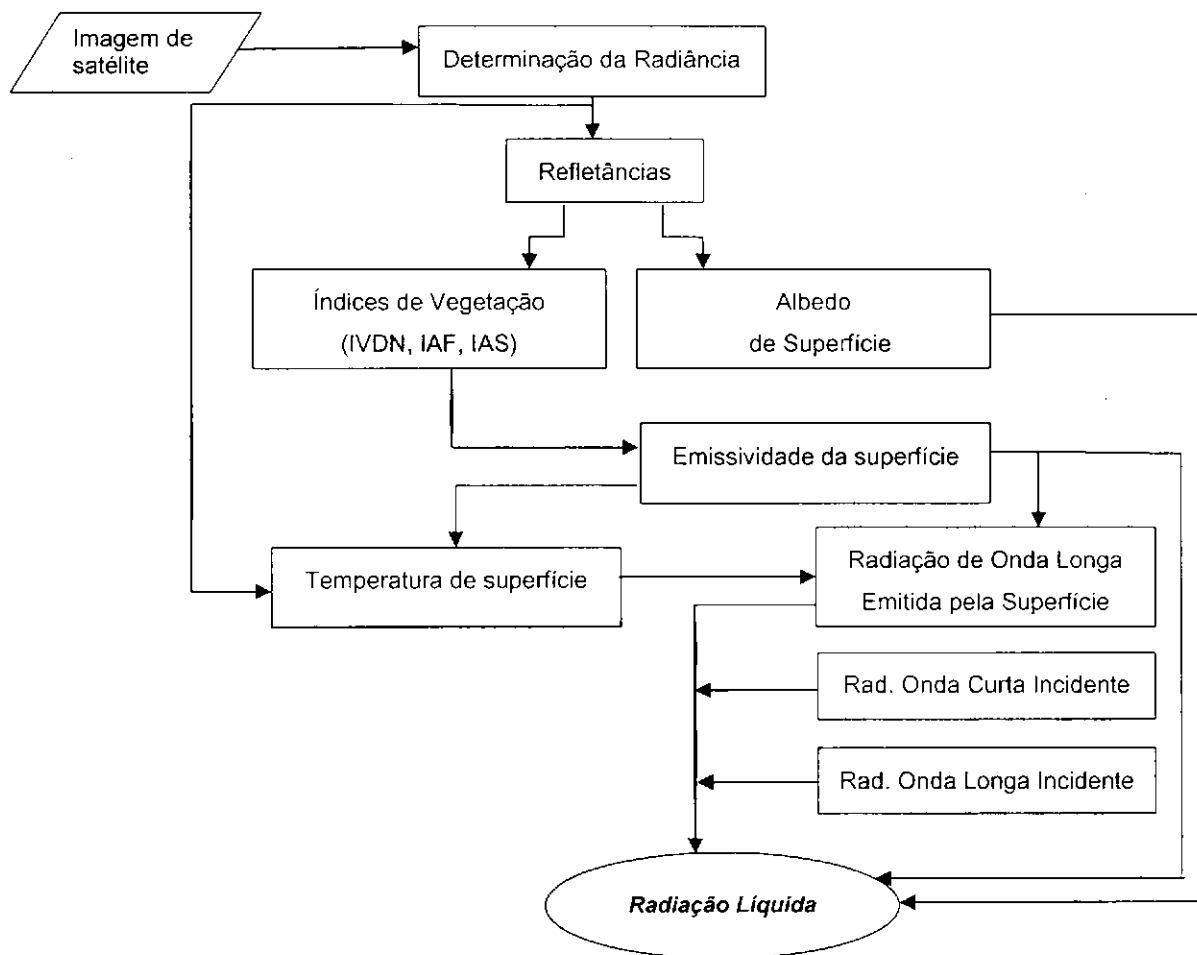


Figura 4: Etapas computacionais para obtenção de R_n a superfície. Fonte: Adaptado de ALLEN et al. (2002).

2.2.2.1. FPAR obtida no campo

O Índice de Área Foliar (IAF), que é definido como a razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área onde a vegetação se encontra, é um indicador da fitomassa e pode ser obtido por equações empíricas com bons resultados (Allen et al., 2007). O IAF medido

no campo é dado pela área total das folhas de uma comunidades de plantas que ocupa determinada área, dividida por esta área. Ele mede a densidade da área foliar da qual é dependente a capacidade da vegetação de interceptar a radiação eletromagnética, e é dado por:

$$IAF = \frac{AF_{planta}}{\acute{A}rea_{solo}} \quad (18)$$

onde: IAF é a área foliar média por planta em cm^2 ,
 AF é a área foliar por planta e
 $\acute{A}rea_{solo}$ é a área do solo ocupada pela planta em cm^2 .

Para determinação do IAF através da medição da refletância das plantas, pode-se utilizar a lei física de Beer, que indica como obter a radiação solar instantânea incidente em uma superfície horizontal considerando a atmosfera presente. Por essa lei verifica-se que a radiação ao atravessar um meio isotrópico e homogêneo sofrerá uma atenuação exponencial a qual é função da espessura e do coeficiente de extinção desse meio, sendo expressa por:

$$I = I^{\circ} \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad \text{ou seja,} \quad IAF = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{I}{I^{\circ}}\right) \quad (19)$$

onde: IAF é a área foliar (adimensional); I é a radiação transmitida ($W m^{-2}$), que expressa a intensidade da radiação dentro da cobertura vegetal a uma determinada altura; I° é a radiação incidente no topo da cobertura vegetal ($W m^{-2}$); k é o coeficiente de extinção da luz no meio (nesse caso a cobertura vegetal), que é função da distribuição espacial dos elementos no dossel (adimensional)

Para o meio vegetal, o k varia com a transmissibilidade da folha e também com o ângulo de elevação solar, descrevendo a variação relativa da transmissão de um meio com a espessura deste. Ele é o coeficiente de extinção (absorção) que, para uma comunidade vegetal com folhas eretas, tem seu valor variando entre 0,3 a 0,5 e para folhas horizontais entre 0,7 a 1,0.

Considerando que a radiação fotossinteticamente ativa disponível ($APAR$ – *Available Photosynthetically Active Radiation*) é determinada através da estimativa da PAR que atinge a superfície, e a fração da PAR absorvida pelo dossel, f_{PAR} (CCRS, 2005), e sabendo que:

$$\left(\frac{I}{I^{\circ}}\right) = 1 - f_{PAR} \quad (20)$$

Pode-se obter a relação logarítmica entre a f_{PAR} e o IAF , substituindo na equação (18). A obtenção da fração da PAR (f_{PAR}) interceptada pela vegetação, pode assim ser obtida através de medições em campo ($f_{PARcamp}$), sendo ser expressa como uma relação entre o IAF e o coeficiente de extinção da luz (k):

$$f_{PARcomp} = 1 - \exp^{(-k \cdot IAF)} \quad (21)$$

2.2.2.2. FPAR obtida através de IVs

Após a obtenção da radiação líquida à superfície, R_n , é possível se estimar a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), que faz parte da radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) (0,3 - 3,0 μm) sendo a faixa de 400 nm a 700 nm. A PAR varia principalmente com a visibilidade, a camada de ozônio e a cobertura de nuvens. Entretanto, um valor aceito para representar a PAR deve estar entre 45 e 50% do valor da $R_{s\downarrow}$ em 24 horas. Assim considerar-se-á a PAR, fornecida em (W m^{-2}), como:

$$PAR = 0,48 \cdot R_{s24} \quad (22)$$

Por sua vez, a APAR (*Available Photosynthetically Active Radiation*), também dada em (W m^{-2}), pode ser determinada através da seguinte equação:

$$APAR = f_{PAR} \cdot PAR \quad (23)$$

Assim, a fração da PAR, $f_{PAR} = (APAR / PAR)$, é obtida da equação (22), tendo sido comprovado sua relação não-linear com o índice de área foliar (IAF) (GOUDRIAAN, 1977).

Entretanto, alguns autores apresentaram uma aproximação linear da f_{PAR} para diversas culturas, que foi derivada matematicamente das refletâncias nas faixas espectrais do vermelho e infra-vermelho próximo, dada por (BASTIAANSEN e ALI., 2003, NAMAYANGA, 2002):

$$f_{PAR} = -0,161 + 1,257 \cdot (NDVI) \quad (24)$$

Assim, f_{PAR} pode ser definida como a proporção da radiação disponível em faixas específicas do espectro onde a vegetação absorve a radiação fotossinteticamente ativa.

Também é possível usar outros índices de vegetação para estimativa da f_{PAR} . Baret e Guyot (1991) testaram os potenciais e limitações de diferentes índices de vegetação para estimar os parâmetros biofísicos IAF e FPAR. Os índices foram o NDVI, o PVI, o SAVI e o TSAVI. Através de simulações, avaliaram a influência da geometria da copa (IAF e inclinação das folhas) e o efeito do solo.

Esses autores, baseados na Lei de Beer expressaram a variação do índice de vegetação como uma função do IAF, sendo dado por (BARET e GUYOT, 1991):

$$IV = IV_{max} + (IV - IV_{max}) \exp^{(-k_v \cdot IAF)} \quad (25)$$

onde IV = Índice de Vegetação; IV_{max} = valor assintótico do índice de vegetação para IAF tendendo ao máximo; k_v = coeficiente que controla a inclinação da relação, equivalente ao coeficiente de

extinção. Esse parâmetro representa o aumento relativo no índice de vegetação devido a um aumento no IAF. E é assim chamado por analogia à clássica lei de Beer onde o coeficiente de extinção (ou absorção) descreve a variação relativa da transmissão de um meio com a espessura deste.

Assim, pela lei de Beer, a f_{PAR} pôde ser expressa em função do IAF, dada como:

$$f_{PAR} = f_{PARmax} \cdot (1 - B \cdot \exp^{-k_n \cdot IAF}) \quad (26)$$

onde: f_{PARmax} é o valor limite assintótico da absorção da PAR, e B é um parâmetro que varia entre 0,8 e 1,2 dependendo de erros e desvios do modelo devido a distribuição aleatória das folhas, mas usualmente definido como 1 de acordo com Baret e Guyot (1991).

Quando o coeficiente de extinção da luz é obtido para uma cultura específica, o IAF pode ser então calculado por medição em campo, (equação 22) ou estimado através de medições da refletância da vegetação (equação 23). Dependendo do tipo de vegetação, do ângulo de incidência solar e das condições gerais da cultura, diferentes IVs podem gerar diferentes IAFs e, conseqüentemente, FPARs e fitomassas diferenciadas (GOEL, 1988; ZARCO-TEJADA et al., 2003).

Broge e Lebranc (2001), baseados na Lei de Beer e usando modelos de transferência radiativa, obtiveram equações preditivas para o RDVI, TVI, MSAVI e MTVI2, que foram testadas por Haboudane et al. (2004). Por sua vez, Allen et al., 2002, considerando as equações obtidas por Huete (1988), obtiveram as equações preditivas do IAF através do SAVI e NDVI. Essas equações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF), baseada em seis índices de vegetação (IVs), testadas para a cultura do algodoeiro (HABOUDANE et al., 2004, ZHAO et al., 2005).

IV	IAF
RDVI	$IAF_{RDVIs} = 0,0918 \cdot e^{(6,0002 \cdot RDVI)}$
SAVI	$IAF_{SAVIs} = \left(\ln \left(\frac{(0,69 - SAVI)}{0,59} \right) \right) / 0,91$
NDVI	$IAF_{NDVIs} = -1,585 \cdot (\ln(0,69 - NDVI))$
TVI	$IAF_{TVIs} = 0,1817 \cdot e^{(4,1469 \cdot TVI)}$
MSAVI	$IAF_{MSAVIs} = 0,1663 \cdot e^{(4,2731 \cdot MSAVI)}$
MTVI ₂	$IAF_{MTVI2s} = 0,2227 \cdot e^{(3,6566 \cdot MTVI2)}$

2.2.3. Eficiência do Uso da Luz (ϵ) e a Fitomassa

A determinação da f_{PAR} e dos IVs, por sua vez, nos permite estimar diretamente a fitomassa e produtividade da cultura, através do fator de eficiência do uso da luz solar, que representa a eficiência de conversão da radiação solar em fitomassa (MONTEITH, 1972).

Como forma de evitar os problemas gerados pela saturação de alguns índices espectrais, bem como de minimizar o efeito das interferências atmosféricas ou do solo que os IVs podem provocar no IAF, alguns autores preferem usar as relações da fração da radiação fotossinteticamente ativa (f_{PAR}) interceptada pela vegetação para interpretação dos IVs (MONTEITH, 1972). A produtividade da planta pode então ser estimada diretamente, introduzindo-se o fator de eficiência do uso da luz (ϵ) (FIELD et al., 1995).

Dessa forma, a fitomassa da cultura, fornecida em ($kg\ m^{-2}$), pode ser determinada pela seguinte expressão (MONTEITH, 1972):

$$Fitom = \int PAR \cdot f_{PAR} \cdot \epsilon \cdot \Delta t \quad (27)$$

onde: ϵ ($g\ MJ^{-1}$) é a eficiência do uso da luz,

f_{PAR} é a fração da radiação fotossinteticamente ativa recebida pela vegetação,

PAR é a radiação fotossinteticamente ativa incidente acima da vegetação ($0,4 - 0,7\ \mu m$), e

Δt o intervalo de tempo.

Os componentes do balanço de energia, juntamente com o modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) de Monteith (1972) e o modelo de eficiência da luz de Field et al. (1995), são a base para a determinação da fitomassa acumulada na superfície, como mostrado no diagrama da Figura 5.

A combinação de dados obtidos à superfície com dados de satélite são úteis na estimativa da radiação líquida e da produção primária (*Net Primary Production* (NPP), tendo sido desenvolvido primeiramente por Potter et al. (1993) e posteriormente expandido e divulgado por Field et al. (1995). Esse modelo, denominado CASA (*Carnegie Institution Stanford model*), é capaz de converter a APAR e o fator de eficiência do uso da luz ϵ ($g\ MJ^{-1}$) em NPP para uma dada área (x) num tempo especificado (t). O fator de eficiência do uso da luz, ϵ , é afetado pela umidade do solo, sendo difícil de quantificar devido a sua variabilidade temporal e espacial, estando relacionado à temperatura de superfície como um indicador para o teor de umidade. Entretanto, as alterações inseridas por Field et al. (1995) no modelo foram para tornar possível a adequação do ϵ para tempo e espaço distintos, permitindo que ele varie de acordo com as condições de disponibilidade de água, da cultura em estudo e sua sazonalidade.

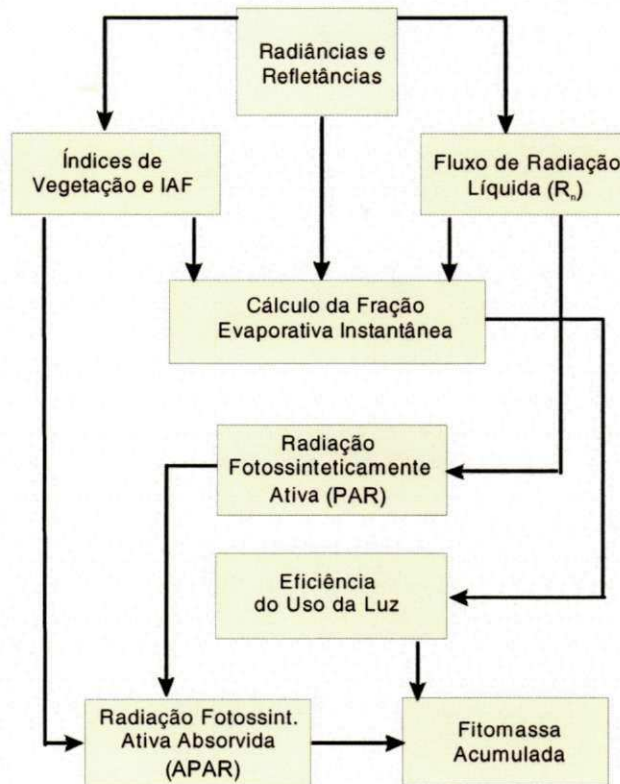


Figura 5. Modelo para determinação da fitomassa acumulada acima da superfície. Fonte: Adaptado de BRANDÃO et al., 2006.

Assim, o novo ε proposto por Field et al. (1995), além de mudanças na temperatura da área em estudo, inclui alterações devido à umidade do solo sendo usadas para determinação da fitomassa e denominada de fração evaporativa (Λ), conforme apresentado no diagrama da Figura 5. Esse fator de eficiência do uso da luz, ε , determinado considerando as variações sazonais, e também os diferentes biomas, é então dado por (FIELD et al., 1995):

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon'(x, t) \cdot T_1(x, t) \cdot T_2(x, t) \cdot \Lambda \quad (28)$$

onde ε ($g MJ^{-1}$) é a variável corrigida no tempo e no espaço do fator de eficiência da luz,

ε' é o valor máximo global uniformizado do uso de eficiência da luz, dado como $2.5(g MJ^{-1})$

Λ é a fração evaporativa instantânea na área em estudo.

A fração evaporativa instantânea foi considerada por alguns autores como similar a de 24h, e é usada para calcular a evaporação real de 24h dos fluxos instantâneos do calor latente. Ela é dada por:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{(R_n - G)} \quad (29)$$

em que λE é o fluxo do calor latente, em ($W m^{-2}$), é fornecido como o resíduo do balanço de energia e dado por (ALLEN et al., 2007): $\lambda E = R_n - G - H$

O fluxo do calor latente (λE) associado com as perdas evaporativas é o processo dominante da troca de energia em áreas vegetadas. A radiação de onda curta incidente - R_{S1} fornece a energia para a fotossíntese, a transpiração e a evaporação, tornando assim o seu estudo um bom meio de estimar as trocas da energia na atmosfera.

Assim a equação (27) pode ser resolvida após a determinação do fator, ε , juntamente com a APAR e fração evaporativa (Λ), fornecendo a fitomassa acumulada em ($kg\ m^{-2}$) com valor otimizado para diferentes biomas, relacionando-a à fração evaporativa e as temperaturas máxima e mínima às quais a cultura está submetida, durante o período de máximo crescimento vegetativo (BRADFORD et al., 2005; BASTIAANSEN e ALI, 2003; FIELD et al., 1995). Assim a equação 27 torna-se:

$$Fitom_{Sat} = APAR \cdot \varepsilon \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \Lambda \quad (30)$$

em que: $Fitom_{Sat}$ é a fitomassa acumulada acima do solo no período t , determinada pelos métodos SEBAL e CASA.

As temperaturas T_1 e T_2 estão relacionadas ao ajuste do crescimento da planta por meio da temperatura. Elas são obtidas pela temperatura média durante o mês de máxima cobertura vegetal (T_{opt}) e da média mensal da temperatura do ar durante todo o ciclo da cultura (T_{men}), sendo dadas por (BRADFORD et al, 2005):

$$T_2 = 1,185 \cdot \left\{ 1 + \exp(0,2 \cdot T_{opt} - 10 - T_{men}) \right\}^{-1} \left\{ 1 + \exp[0,3 \cdot (-T_{opt} - 10 + T_{men})] \right\}^{-1} \quad (31)$$

$$T_1 = 0,8 + (0,02 \cdot T_{opt}) - [0,0005 \cdot (T_{opt})^2] \quad (32)$$

onde T_{opt} é a temperatura média durante o mês de máximo NDVI, e T_{men} é a média mensal da temperatura do ar.

A eficiência do uso da luz - ε é sensível à densidade da cobertura vegetal e às condições de umidade. Após a classificação das áreas de cobertura vegetal em Barbalha, CE, mostrando solos com vegetação rala até áreas com vegetação densa, onde o NDVI variou entre 0,18 e 0,72, Brandão et al. (2006) constataram valores de ε variando de 2.704 ($g\ MJ^{-1}$) até 0.612 ($g\ MJ^{-1}$). Para estes diferentes tipos de vegetação o aumento da fitomassa se apresentou numa faixa de 8,04 a 317,69 ($t\ ha^{-1}$), indicando a sensibilidade desse fator à cobertura vegetal como apresentado na Figura 6.

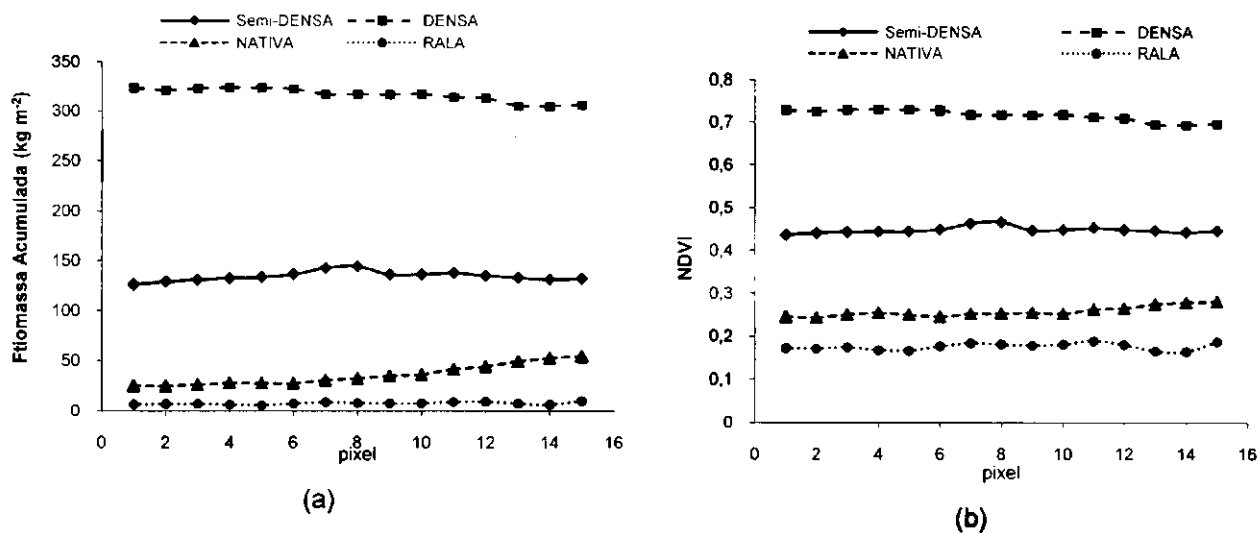


Figura 6. Valores médios extraídos das imagens, escolhidos em subconjuntos de 15 pixels para: (a) a fitomassa acumulada, e (b) o NDVI. Brandão et al. (2006).

2.3. Relação entre os IVs e a fitomassa do algodoeiro

O melhoramento dos índices de vegetação elevou o potencial do uso de imagens de satélite para a quantificação de variáveis biofísicas de algumas culturas. Muitos IVs vêm sendo usados na obtenção de dados precisos do índice de área foliar, da altura da planta e fitomassa acumulada acima do solo, assim como na determinação da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), com o objetivo de estimar a produtividade das culturas agrícolas e fazer uma avaliação da necessidade hídrica da cultura que está sendo monitorada em tempo real (SHARMA et al., 1993).

Brandão et al. (2008) usaram o modelo da produção de fitomassa proposto por Monteith (1972) para estimar o acúmulo de fitomassa em plantações de algodão cultivadas na região de Primavera do Leste, MT (15°34'S, 54°18'W), através do uso de imagens TM Landsat 5. Eles obtiveram as relações entre as variáveis biofísicas do algodão e o NDVI, determinado através das bandas espectrais do IVP e do V do Landsat 5, tendo sido observado uma alta correlação entre a elevação da fitomassa e o aumento do NDVI, e que foram usados para determinação da produtividade fornecendo valores precisos, com R² acima de 0,7 (BRANDÃO et al., 2006).

Thenkabail et al. (2000), num estudo com quatro culturas (algodão, soja, batata e milho), comparando o NDVI obtido através de faixa larga e estreita, que incluíram os comprimentos de onda na região verde, mostraram que o modelo de produção de fitomassa acumulada de Monteith é bastante adequado à determinação da fitomassa, desde que considerados os fatores de ajuste para cada cultura. Segundo ele, além da umidade, que influencia diretamente no fator de eficiência do uso da luz - ϵ , o índice de colheita também deve ser determinado em campo para ajustar os índices obtidos via sensoriamento remoto.

3. Material e Métodos

3.1. Caracterização da área experimental

3.1.1. Localização

Para implantação do experimento foi escolhido o município de Apodi, no Rio Grande do Norte, localizado na mesorregião Oeste Potiguar e na microrregião da Chapada do Apodi, limitando-se com os municípios de Governador Dix-Sept Rosado, Felipe Guerra, Caraúbas, Umarizal, Itaú, Severiano Melo e o Estado do Ceará (Figura 7). A sede do município tem uma altitude média de 67 m e apresenta coordenadas centrais de $05^{\circ}39'50,4''$ de latitude sul e $37^{\circ}47'56,4''$ de longitude oeste, distando da capital cerca de 334 km. (IBGE; IDEC, 1997). A estação experimental da EMPARN, onde foram instalados os experimentos, está localizada a cerca de 6 km a noroeste da sede do município de Apodi, cujas coordenadas são $5^{\circ}37'19''$ S e $37^{\circ}49'06''$ W, com altitude média de 129 m. Na Figura 7 pode-se ainda verificar que o município encontra-se dentro da área de zoneamento com aptidão plena para o algodoeiro.

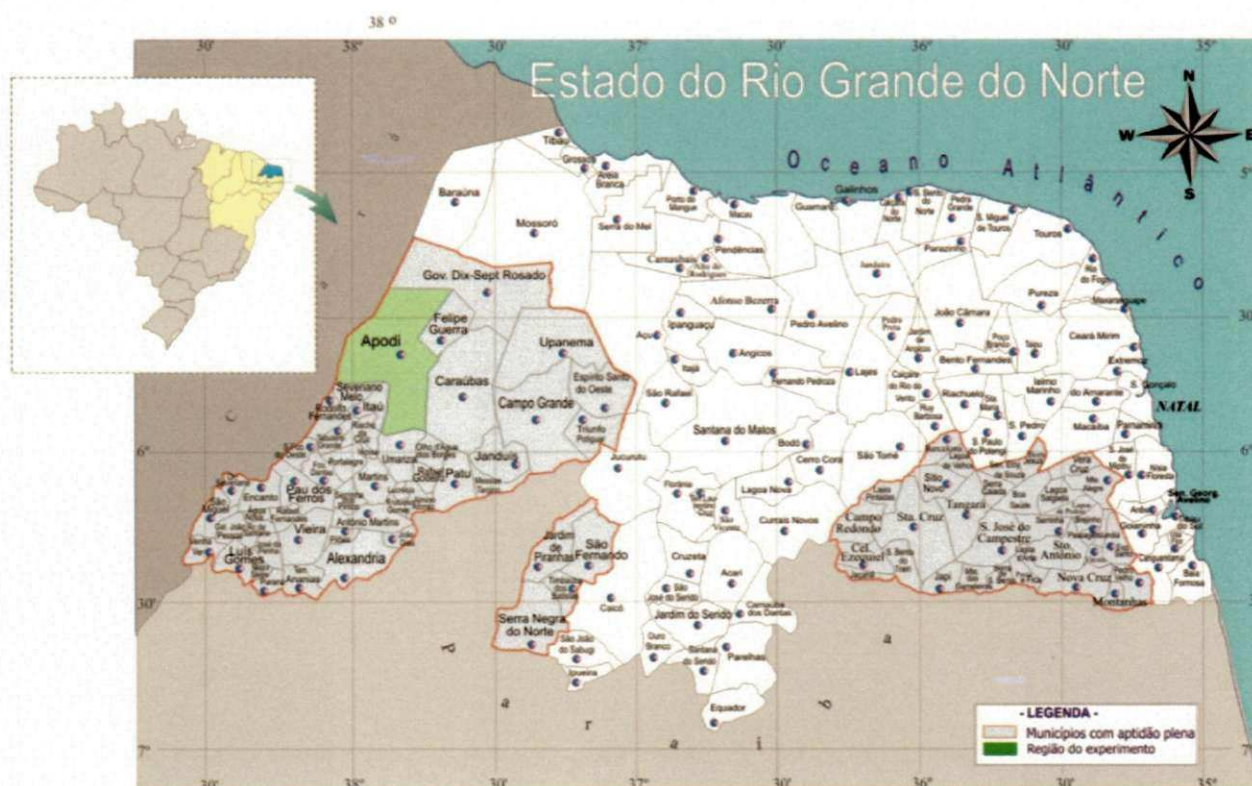


Figura 7. Localização do Município de Apodi, RN, com coordenadas geográficas $05^{\circ}39'50,4''$ de latitude sul e $37^{\circ}47'56,4''$ de longitude oeste e áreas de zoneamento para a cultura do algodão no RN.

3.1.2. Clima

O clima da região é caracterizado como tropical quente e semiárido com predominância do tipo **BSw'h'**, da classificação climática de Köppen (KÖPPEN e GEIGER, 1928), com a estação chuvosa se atrasando para o outono. Com base nos dados da estação agroclimatológica instalada na área tem-se as seguintes características: temperatura média anual de 28,5°C, com mínima de 22°C e máxima de 35°C, umidade relativa média do ar de 60%, precipitação pluvial média anual de 772 mm, com distribuição bastante irregular das chuvas. A região possui insolação anual de 3.030 horas/ano, enquanto que a evaporação média anual atinge a marca de 3.215 mm e a velocidade média do vento de 7,5 m s⁻¹ (INMET, 2008; INPE, 2008).

3.1.3. Solos

Na Chapada do Apodi os solos são mais profundos que no resto da Depressão Setentrional, calcários, mais planos e com água subterrânea. Porém, como é típico de áreas calcárias, não há rede fluvial organizada. A Chapada, onde está localizado o município com o mesmo nome, é uma grande superfície cárstica, onde predominam os cambissolos e os latossolos eutróficos, ambos bem drenados e de alta a média fertilidade natural (SEMARH-RN, 2008). A altitude varia de 20 a 120 m, com relevo plano e drenagem moderada. A distribuição dos solos em toda a região da Chapada do Apodi está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos solos que compõem a Chapada do Apodi

Classe de Solos*	Área	
	Km ²	%
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	3.992,9	28,0
Cambissolo Háplico Eutrófico	2.707,0	19,0
Luvissolo Crômico Órtico	1.674,0	11,8
Neossolos Litólicos Eutrófico	1.528,2	10,7
Chernossolo Rêndizico Lítico	963,2	6,7
Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	683,0	4,8
Latossolo Amarelo Distrófico	503,9	3,5
Vertissolo	269,5	1,9
Gleissolo Sáfico Sódico	218,4	1,5
Planossolos Nátricos Órtico	206,3	1,4
Neossolo Regolítico Eutrófico	170,4	1,2
Neossolo Flúvido Eutrófico	146,9	1,0
Planossolo Háplico Eutrófico Solódico	916,3	6,4
Total	14.276,0	100,0

Fonte: Relatório HE-1358-R03-0397 do plano estadual de Recursos Hídricos. SEMARH-RN (2008). *De acordo com a tabela de equivalência de solos para a nova denominação (EMBRAPA SOLOS, 2009)

Especificamente para a área reservada ao experimento os solos são predominantemente classificados como Cambissolo Eutrófico.

Quanto à formação vegetal, o município possui Caatinga Hiperxerófila - vegetação de caráter mais seco com abundância de cactáceas e plantas de porte mais baixo e espalhadas a exemplo da jurema preta (*Mimosa hostilis*), faveleiro (*Cnidoscolus phylacanthus*), mofumbo (*Combretum leprosum*), facheiro (*Pilosocereus piauhinensis*), xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) e marmeleiro (*Croton sincorensis*), além do Carnaubal- vegetação natural onde espécie predominante é a a carnaúba (*Copernicia prunifera*).

3.1.4. Águas

O município de **Apodi** encontra-se totalmente inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica Apodi-Mossoró, que ocupa uma superfície de 14.276 km², correspondendo a cerca de 26,8% do território estadual (Figura 8). Esse município é banhado pela sub-bacia do Rio Apodi, que o atravessa em sua porção central, no sentido SW/NE.



Informações: Apodi-Mossoró, Precipitação Média: 772 mm, Principal Rio: Rio Apodi, Área: 14.276,00 km²

Figura 8. Bacia Apodi –Mossoró. Adaptado de: Plano Estadual de Recursos Hídricos, SEMARH-RN (2008).

A Barragem de Santa Cruz, distante 18 km a montante da sede do município de Apodi, tem como finalidade a irrigação de 9.236 ha na Chapada do Apodi no perímetro denominado Projeto de Irrigação Santa Cruz do Apodi com anteprojeto de engenharia e estudo de viabilidade já executados pelo DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS, 2008).

Na área experimental, foi utilizado um poço, que, dentre os 340 poços cadastrados no município, encontra-se entre os que possuem água doce (53%), segundo dados da Secretaria do Desenvolvimento Energético, do Ministério das Minas e Energia (MME) (SEMARH-RN, 2008).

3.1.5. Cultivar

Foi escolhido a cultivar BRS 187 8H que é recomendada para o semiárido (EMBRAPA, 2008). Da sementeira à colheita essa cultivar gasta em torno de 130 dias. O porte da planta é de 1,1 m, em média. Em anos de precipitações regulares na região Nordeste sob condições de sequeiro ele pode produzir até 3.000 kg ha⁻¹. Em condições de irrigação a produção estimada é de 4.000 kg ha⁻¹. (EMBRAPA, 2008).

3.2 Tratos fitossanitários e adubação mineral

A Tabela 3 contém os nomes comerciais dos produtos químicos aplicados à cultura do algodoeiro na área experimental durante esse estudo, para o controle fitossanitário e fertilização do solo.

Tabela 3 - Produtos agroquímicos aplicados à cultura do algodoeiro na área experimental em Apodi

Aplicação de produtos agroquímicos				
Data/Período	Produto	Grupo Químico	Quantidade	Finalidade
04-08-2008	Diuron	(diuron) Uréia substituída	1,5 l ha ⁻¹	Herbicida Inibidor de fotossíntese
04-08-2008	Premierlin	(trifluralin) Dinitroanilina	4 l ha ⁻¹	Herbicida Inibidor da divisão celular
19-09-2008	Glifosato	(glifosato) Derivado da Glicina	3,5 l ha ⁻¹	Herbicida Inibidor da síntese de aminoácidos
19-09-2008	Dual Gold	S-metolachlor (cloroacetanilida)	1,0 l ha ⁻¹	Herbicida inibidor do crescimento das plantas
-*	Actara 250 WG	Tiametoxan (neonicotinóide)	200 g ha ⁻¹	Controle de pulgões, trips e mosca branca
-*	Endossulfam	Endossulfam (ciclodienoclorado)	2 l ha ⁻¹	Controle de bicudo e curuquerê
-*	Match EC	Lufenuron (bezoiluréia)	0,8-1,0 l ha ⁻¹	Controle de curuquerê e lagarta da maçã
-*	Vertimec EC	Abamectina (avermectina)	0,3 a 0,6 l ha ⁻¹	Controle de ácaros e curuquerê
Adubação mineral				
04-08 a 30-10-2008	Uréia, (NH ₂) ₂ CO ₂ (45% N)		0,0 kg 230,4 kg 460,8 kg 691,2 kg	Fertilização
04-08-2008	Cloreto de potássio, KCl (60% K ₂ O)		76,8 kg	Fertilização
04-08-2008	Super Triplo (42% P ₂ O ₅)		0,0 kg 329,152 kg 658,304 kg 987,456 kg	Fertilização
04-08-2008	FTE		5,76 kg	Fertilização - micronutrientes
04-08-2008	Ac. Bórico		13,184 kg	Fertilização - micronutrientes

3.3 Métodos

Para estimar a produtividade do algodoeiro foram testados alguns índices de vegetação na predição do índice de área foliar (IAF), com redução da variabilidade devido a efeitos atmosféricos, mudanças na concentração da clorofila da folha e a influência do solo na refletância do dossel.

Foram usados dados de espectrorradiometria de campo, bem como, dados meteorológicos obtidos à superfície, para determinação da relação entre a quantidade de matéria acumulada e a FPAR.

Também foram feitas avaliações estruturais para acompanhamento do crescimento, com medições em campo de altura de planta, em 6 plantas/parcela, bem como do tamanho das folhas, tomando como base o comprimento da nervura central e utilizando o método de Grimes para o cálculo da área foliar (GRIMES e CARTER, 1969) e índice de área foliar.

As imagens de satélite serviram para o desenvolvimento de um modelo prático para determinação da fitomassa de acordo com o modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) para vegetação verde de Monteith (1972), e o modelo de eficiência da luz de Field et al. (1995), bem como da avaliação do estado nutricional da planta.

Os algoritmos usados serviram para modelar e testar vários índices espectrais, auxiliando na compreensão do efeito que parâmetros bioquímicos e estruturais da vegetação têm na refletância do dossel. Além disso, a fitomassa acumulada acima da superfície foi calculada para diferentes índices de vegetação, sendo feita uma análise de qual deles responde melhor aos teores de clorofila foliar.

Os índices de vegetação foram determinados através de espectrorradiometria de campo. As medidas multi-espectrais da refletância das folhas foram realizadas utilizando-se um espectrorradiômetro automático com leitura absoluta e de alta resolução, que opera acima de uma ampla cadeia dinâmica e espectral, com baixa dissipação, equipado com detector de fotodiodo Si, na faixa de 350 nm até 1.100 nm, da Apogee, onde a precisão do comprimento de onda desse sensor é menor que 0,25 nm, com estabilidade do comprimento de onda inferior a 0,001 nm por °C. Os dados espectrorradiométricos foram coletados em campo, em dias claros com ângulo de elevação solar variando entre 45° e 65° para minimizar efeitos atmosféricos.

As medições da fitomassa em campo serviram para validação do modelo obtido para determinação da produtividade do algodoeiro, fazendo-se a comparação entre os valores de campo e os do modelo desenvolvido.

3.3.1 Solo

Para a caracterização química do solo se usou o intervalo entre 0,20 m e 0,60 m de profundidade, divididos em três faixas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm, envolvendo aspectos físicos e químicos referentes aos principais cátions, ânions, pH, condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, matéria orgânica, fósforo total, nitrato, potencial de acidez e capacidade de troca de cátions (CTC), utilizando-se as metodologias de análise recomendadas pela Embrapa (1997).

A coleta da amostra de solo, para fins de caracterização química dos principais cátions e ânions, foi feita em dois períodos específicos definidos com base no início da programação de irrigação e semeadura, estando assim planejados: o primeiro, entre 25 e 35 dias antes do início dos eventos de irrigação na área e o segundo após a colheita para determinação do efeito residual da adubação no solo.

Os solos da área experimental foram classificados como Cambissolo Eutrófico e os resultados da análise química antes da correção e instalação do experimento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Características químicas do solo, coletado em três profundidades, no campo experimental, localizado em Apodi, RN.

Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	MO (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	SB (cmol _c dm ⁻³)	CTC (cmol _c dm ⁻³)
0-20	6,20	3,92	23,69	0,83	0,69	5,00	2,40	2,47	8,92	11,40
20-40	6,10	2,40	20,92	0,63	0,54	5,80	2,90	2,14	9,87	12,01
40-60	6,20	2,40	20,92	0,53	0,40	6,50	2,50	1,82	9,93	11,74

3.3.2 Água e dados meteorológicos

Foi implantado o sistema de irrigação por aspersão, com espaçamento de 15 m x 12 m, dispostos a 1 metro acima do nível do solo, com um alcance de 15 m e sistema automatizado de distribuição (Figura 9).

O suprimento de água às plantas no âmbito da programação, manejo e operações da irrigação foi baseado na demanda climática local com ênfase na evapotranspiração de referência (ET_o) medida na estação meteorológica automática da EMPARN instalada a 100 m do local do experimento e um Sistema Automático de Razão de Bowen (SARB) da Campbell Scientific Inc, instalada na área experimental, cultivada com o algodão BRS 187 8H (Figura 10).



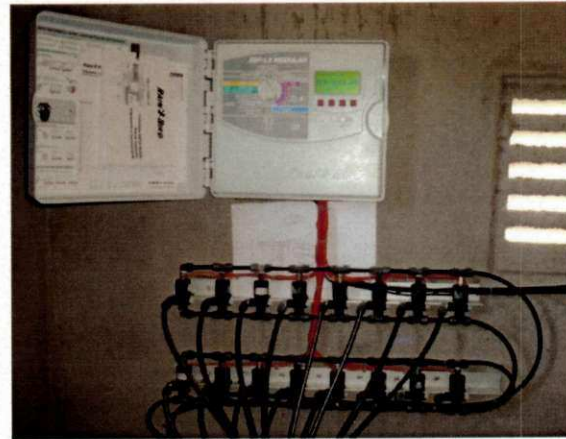
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9: Instalação do Sistema de Irrigação por Aspersão. (a) Poço. (b) Aspersores. (c) Distribuidor. (d) Sistema Automático de Controle.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Estação meteorológica automática no Campo Experimental da EMPARN e (b) SARB instalado na cultura do algodão.

O suprimento de água às plantas e o manejo da irrigação foi baseado na demanda hídrica local com ênfase na evapotranspiração da cultura (ETc) medida pelas estações instaladas no campo. Para estimativa da evapotranspiração da cultura, foi utilizado o método do balanço de energia baseado na Razão de Bowen. Esta estação meteorológica que foi instalada para fornecimento de dados ao experimento continha os seguintes sensores: dois piranômetros para medição da radiação solar global (Rs) e refletida pela cultura (Rf); um saldo radiômetro para medição do saldo de radiação (Rn); dois termopares de cobre e “constantan”, instalados em dois níveis, mantidos a 0,30 e 1,50 m acima da copa da cultura; dois anemômetros para medição da velocidade do vento nos dois níveis e dois fluxímetros para medição do fluxo de calor no solo. Todos estes sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (Datalogger, da Campbell Scientific), programados para efetuar uma leitura dos sinais analógicos e digitais a cada 5 segundos e extrair e armazenar as médias em intervalos de 30 minutos. (Figura 10b).

Com os equipamentos instalados foi possível a obtenção da radiação líquida (Rn) dada em ($W m^{-2}$) e mensurada a 1,00 m acima da superfície vegetada; o fluxo de calor no solo fornecido em ($W m^{-2}$) e medido em dois pontos (G1 e G2) a uma profundidade de a 0,08 m abaixo do solo, além dos gradientes de temperatura e de tensão de vapor d'água do ar acima da superfície. A partir das medições da Radiação Líquida (Rn), dos fluxos de calor no solo (G1 e G2), das diferenças de temperatura (DT) e da pressão de vapor (De) entre dois níveis, foi determinado o balanço de energia, fornecido em ($W m^{-2}$), conforme a Equação (14), vista anteriormente.



Figura 11. Utilização da Sonda Delta T, no campo experimental de Apodi, RN

Para avaliação da demanda climática foi realizado o monitoramento do teor volumétrico de água no perfil do solo por meio de sondas DELTA-T DEVICES (ΔT) inseridas numa haste nas profundidades de: 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm (Figura 11), além da utilização de um sistema de medidas tensoriais montado com tensiômetros de coluna de Hg, para medir o teor de água nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, e de 60-80 cm (Figura 12).



Figura 12. Medição com tensiômetros instalado em diversas profundidades no campo experimental de Apodi, RN.

O SARB instalado na área experimental foi conectado a um sistema de coleta e aquisição de dados (Datalogger modelo 21X da Campbell Scientific), programado para realizar leituras a cada segundo e armazenar valores médios em intervalos de 30 minutos.

3.3.3. Instalação do experimento e coleta de dados

Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de nitrogênio (0, 90, 180 e 270 kg ha⁻¹), quatro doses de fósforo (0, 120, 240 e 360 kg ha⁻¹) e quatro épocas de avaliação (40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE)). Adotou-se delineamento em blocos casualizados com 3 repetições, sendo as parcelas constituídas por 13 linhas espaçadas de 0,9 m, com 15 metros de comprimento e 12 plantas por m², totalizando 2.340 plantas/parcela e tratamentos distribuídos em esquema de parcela subdividida no tempo. Nas parcelas estudou-se os efeitos das doses de N e P, e nas subparcelas os efeitos das épocas de avaliação.

As doses de nitrogênio foram aplicadas na linha de plantio na forma de uréia, parceladas em duas aplicações, sendo a primeira dose aplicada na semeadura (1/3 da dose), e a segunda dose (2/3 da dose) aos 38 dias após a emergência (DAE). Por ocasião da semeadura foram aplicados na linha de plantio 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de superfosfato triplo, 40 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio, 2 kg ha⁻¹ de B, como ácido bórico, além de 25 kg ha⁻¹ de FTE.

Para a determinação do teor de N foliar foram colhidas de 20 plantas representativas, a 5^a folha do algodoeiro a partir do ápice foliar, retiradas das plantas situadas nas linhas 08 e 09 de cada parcela, aos 40 DAE (estádio B₃), 60 DAE (estádio F₃), 80 DAE (estádio C₁) e 100 DAE (C₅), de acordo com a escala de Marur e Ruano (2001) (MALAVOLTA et al., 1967). Simultaneamente à coleta das folhas, foram feitas as medições com o clorofilômetro portátil, obtendo-se a média de 5 leituras por planta, em 20 plantas por parcela, realizadas na 5^a folha completamente expandida a partir do ápice (MALAVOLTA et al., 2004).

As folhas foram identificadas, lavadas, acondicionadas em sacos de papel perfurados e secas em estufa com circulação de ar forçada a 65°C. Posteriormente, as amostras de folhas foram moídas em moinho tipo Willey, passadas em peneira de malha 20 mesh e acondicionadas em saquinhos de papel. As amostras vegetais foram submetidas à digestão nítrico-perclórica para determinar as concentrações de P, K, Ca, Mg e S (JONES Jr. et al., 1991).

Para determinação do teor de N, as amostras foram submetidas à digestão sulfúrica. O N foi determinado pelo método colorimétrico de Nessler (JONES Jr. et al., 1991), o P pelo método da redução do fosfomolibdato, pela vitamina C, modificado por Braga e Defelipo (1974), e o K por fotometria de chama. O Ca e o Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o S por turbidimetria do sulfato.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial. Nas variáveis onde se detectou diferenças significativas entre as doses aplicadas, ajustou-se as curvas de regressão e os pontos de máximo e/ou mínimo das equações foram estimados. A data de semeadura foi 23 de setembro de 2008 (Figura 13), enquanto que a emergência de pelo menos 70% das plantas foi 28 de setembro. As doses foram selecionadas levando-se em conta os resultados apresentados por Carvalho e Ferreira (2006) e Medeiros et al. (2004).



Figura 13. Plantio do algodão no campo experimental da EMPARN, em Apodi, RN. (a) Semeadura. (b) Adubação. (c) Tratamentos aos 60 DAE. (d) Sistema de irrigação e diferença de tonalidades nos tratamentos.

Como não foi adotado espaçamento entre tratamentos, para evitar interferência entre os vizinhos, a área útil para as medições excluiu 1 metro entre parcelas, retirando-se das medições, a linha central entre aspersores e a primeira linha da bordadura, além da exclusão de um metro nas bordas superior e inferior de cada tratamento. A área de cada bloco foi de 60 m x 48 m = 2.880 m², com a área do experimento totalizando 120 m x 96 m = 11.520 m².

Foram reservadas as linhas 10 e 11 para retirada de plantas completas, as linhas 08 e 09 para coleta de folhas para análise laboratorial, ficando da linha 02 até a linha 07 para avaliações da espectrorradiometria de campo. As avaliações de crescimento foram realizadas em plantas marcadas e identificadas na terceira linha.

3.3.4 Determinação da área foliar (AF)

Nas quatro épocas de avaliação, foram retiradas todas as folhas de duas plantas representativas por parcela. A área foliar de cada planta foi obtida através de um integrador de área foliar da LICOR modelo LAI-3100 (Figura 14). Estas plantas também serviram para quantificação da fitomassa verde e seca. As coletas foram agendadas para os seguintes períodos: 30 dias após a emergência (DAE), esta medição servindo apenas como pré-avaliação, e depois aos 40, 60, 80 e 100 DAE, dando preferência aos dias de passagem do satélite Landsat 5, para melhor concordância dos dados obtidos em campo com os dados obtidos através de imagens do satélite.



Figura 14. Determinação da área foliar de plantas de algodão através do integrador de área foliar, LICOR modelo LAI-3100.

Também foi determinada a área foliar de cada parcela, usando técnicas não destrutivas, baseadas no comprimento da nervura central da folha, servindo apenas para comparação dos dados obtidos com o planímetro (GRIMES e CARTER, 1969). Para esse método usou-se apenas a medição do comprimento da nervura central da folha e a quantidade de folhas por planta, realizadas em 20 plantas/parcela, que foram previamente identificadas.

3.3.5 Índice de área foliar (IAF)

3.3.5.1 Índice de área foliar no campo

O índice de área foliar (IAF) depende da estimativa da área foliar das plantas, servindo para melhor avaliar o crescimento e desenvolvimento das mesmas. Os valores de IAF foram calculados a partir do quociente entre a área foliar (AF) da planta e a área ocupada por esta no solo. Com os dados do stand, determinou-se ainda a área que cada planta ocupa no solo, onde foi considerada uma população média de 110.000 plantas por hectare, uma vez que havia em média 12 plantas por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,90 m. Assim, o IAF foi obtido pela equação (17).

3.3.5.2 Índice de área foliar por satélite

Para o cálculo do Índice de Área Foliar (IAF), foram usados os seguintes índices de vegetação (IVs): NDVI, RDVI, TVI, MSAVI, MTVI2 e SAVI, que foram obtidos através de imagens geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5, órbita 216 e ponto 064, adquiridas junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). A área de estudo foi o campo experimental de APODI, RN, cujas coordenadas centrais são 5°37'19" S e 37°49'06" W.

Foram utilizadas três imagens em fases fenológicas do algodoeiro distintas, obtidas nos dias 01/11/2008, 17/11/2008 e 19/12/2008, correspondendo a 34, 50 e 80 DAE, respectivamente. As imagens do TM Landsat 5 são recebidas em 7 bandas espectrais distintas e precisam de pré-processamento e tratamento para sua utilização e conversão em refletâncias. Assim, após os procedimentos de reprojeção da banda 6 e empilhamento das bandas foi feita a correção do georreferenciamento utilizando-se imagens corrigidas do Landsat 7 que são oferecidas gratuitamente no site www.landsat.org. Depois disso foi feito o recorte da área do experimento e a calibração radiométrica.

Para o cálculo das radiâncias espectrais, de acordo com a metodologia SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), apresentada em detalhes no Apêndice A, foi usada a equação de Chander e Markham, 2003 (Equação 34, Apêndice A), que utiliza as constantes de calibração para o TM Landsat 5 (radiâncias espectrais mínima e máxima) ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), e tem seus valores fornecidos no arquivo cabeçalho que acompanha a imagem,:

Após a obtenção das radiâncias espectrais, determinou-se a refletância espectral planetária em cada banda, através da seguinte equação 35 apresentada em detalhes no Apêndice A. Para obtenção das refletâncias foram usados os valores da irradiância solar espectral no topo da atmosfera (ver Tabela 20 no Apêndice A) e o ângulo de incidência solar, calculado através do ângulo de elevação solar fornecido no arquivo cabeçalho da imagem (BASTIAANSEN, 1995):

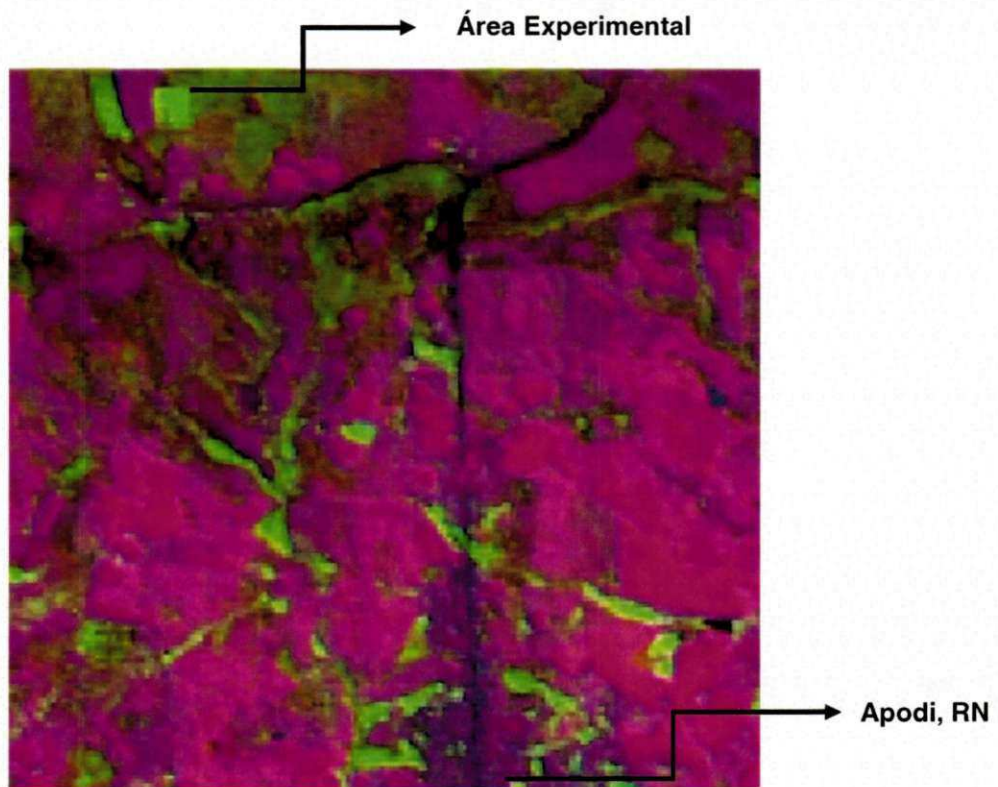
Com as refletâncias para cada canal foi possível o cálculo dos Índices de vegetação. Nesse trabalho foram escolhidos seis IVs baseados na diferença normalizada, na redução dos efeitos do solo e na melhoria da sensibilidade à clorofila. Assim, para os índices escolhidos, quais sejam: NDVI, RDVI, TVI, SAVI, MSAVI e MTVI2, as equações usadas foram as equações (1), (2), (3), (4), (5) e (7), respectivamente, nas seguintes faixas espectrais do Landsat 5: Banda 3, (V - vermelho), Banda 4 (IVP - infravermelho próximo), e Banda 2 (verde).

Uma composição colorida da área experimental pode ser vista na Figura 15a para a imagem do dia 19/12/2008. Essa área, com um total de 11.520 m², comportou apenas 16 pixels (Figura 15b). Assim, para melhor avaliar os IVs da área, consideramos quatro faixas, com N variando de 0-90 e de 180-270, onde foram feitas as médias de quatro tratamentos por cada pixel, para as doses de N citadas acima, e qualquer dose de fósforo, distribuídos como na Figura 15b, avaliando assim o efeito do N sobre o IAF e a produção da fitomassa.

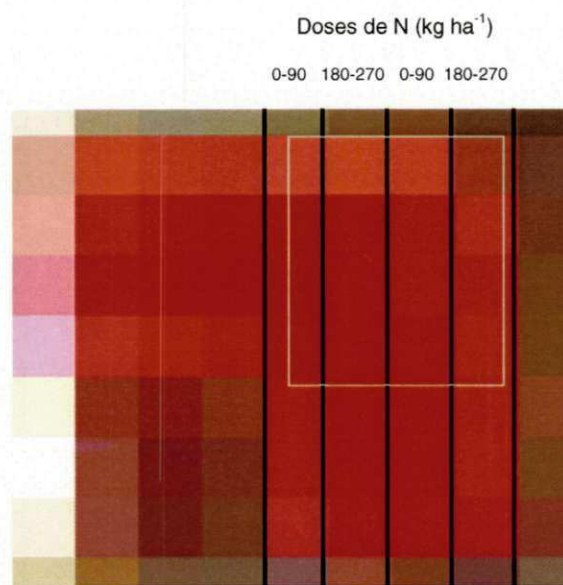
Embora a relação entre os IVs e Índice de Área Foliar (IAF) não seja linear, muitas pesquisas têm se voltado para determinação dessas relações. Nesse estudo foram avaliadas as relações obtidas para determinação do IAF com cada IV estudado, seguindo o modelo logarítmico dado pela Lei de Beer, apresentado na equação 19. As equações preditivas do IAF foram então comparadas àquelas obtidas através de espectrorradiometria de campo.

Para efeito de comparação com os IAFs estimados através dos IVs, e da avaliação da produção da fitomassa usando o modelo de Monteith (1972) dentro do algoritmo CASA, foi também calculado o IAF através da imagem de satélite (IAF_{sat}). De acordo com a metodologia SEBAL, o IAF usado é baseado no SAVI, cuja equação empírica é dada por (Allen et al., 2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{(0,69 - SAVI)}{0,59}\right)}{(0,91)} \quad (33)$$



(a)



(b)

Figura 15. Imagem do TM Landsat 5 em 19/12/2008. (a) Composição RGB: 5, NDVI,3 de parte do município de Apodi, mostrando a área experimental e a sede do município. (b) Distribuição dos pixels na área experimental, cujas coordenadas centrais são $5^{\circ}37'19''$ S e $37^{\circ}49'06''$ W, numa composição RGB: 432, onde os tratamentos foram separados em duas faixas da adubação nitrogenada, quais sejam $0-90$ e $180-270$ kg ha^{-1} .

3.3.5.3 Índices de área foliar por espectrorradiometria de campo

As medidas multiespectrais da refletância das folhas foram feitas utilizando-se um espectrorradiômetro automático com leitura absoluta e de alta resolução da Apogee, como apresentado na Figura 16.

Os dados foram coletados em campo, em dias claros com ângulo de elevação solar variando entre 45° e 65° para minimizar efeitos atmosféricos. As medições foram executadas no período entre 8:30h e 11:00h, considerando a passagem do satélite pelo local do experimento em torno das 10:00h. Poucas medições foram realizadas entre 14:00h e 15:00h, para teste dos valores, observando-se forte interferência devido a cobertura de nuvens a partir das 15:00h. As medidas radiométricas foram repetidas para cada tratamento, reduzindo os efeitos do vento e mudança de posicionamento na folha. As variáveis medidas foram a radiação incidente, a refletância e irradiância, ambas as medidas feitas a aproximadamente 0,90 m da cobertura vegetal.

A coleta dos dados agrônômicos foi realizada simultaneamente às medições radiométricas, com pequenas diferenças de horários devido ao volume de atividades em paralelo. O crescimento das plantas foi determinado pelas variáveis: altura de plantas, número de folhas, área foliar e diâmetro caulinar aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência das plântulas. Por ocasião da colheita determinaram-se o número de capulhos por planta, o peso médio do capulho e a produtividade de algodão em caroço. Além dos dados agrônômicos citados, ao final foram feitas fotografias digitais e hemisféricas dos diversos tratamentos. No final do experimento foram calculadas as produtividades de cada parcela. Muitos dos dados obtidos serviram apenas como base para o estudo, não sendo apresentados resultados e análises para os mesmos.

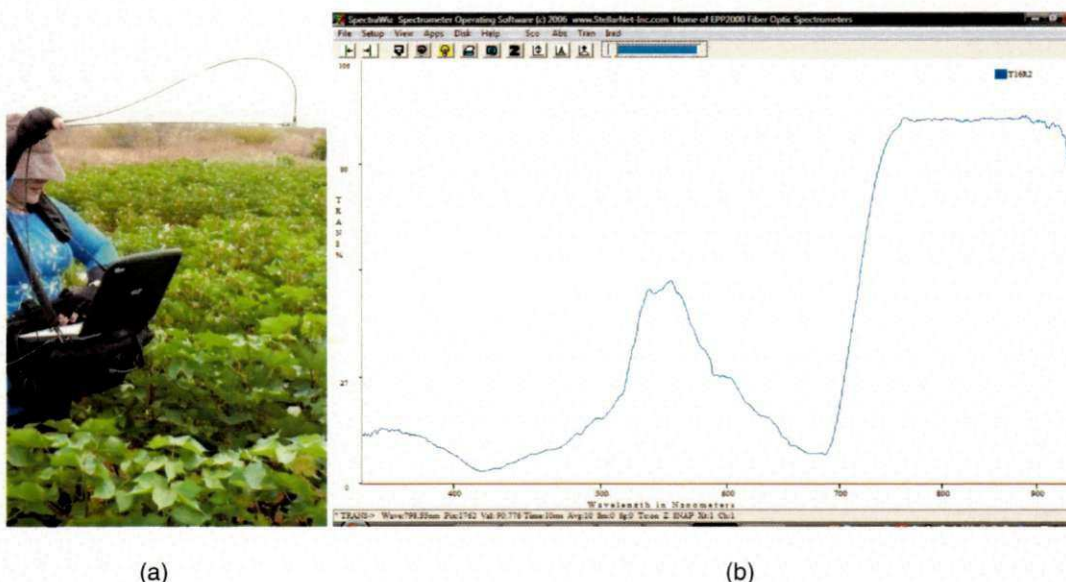


Figura 16. (a) Espectrorradiômetro da Apogee, que opera na faixa de 350 nm a 1.100 nm, em medições realizadas no campo experimental (Apodi, RN), e (b) Medição da refletância do tratamento 16 aos 80 DAE.

Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e regressão polinomial, ajustando-se modelos matemáticos que apresentassem os mais altos coeficientes de

determinação (R^2). Foram estimados os pontos de mínimo e/ou máximo das equações por meio da primeira derivada de "Y" em relação à "X". Foi feita a análise de correlação entre os índices de vegetação obtidos com a fitomassa do algodoeiro obtido em campo. As análises estatísticas foram feitas utilizando-se o software WinStat e os gráficos com o SigmaPlot 10.0.

3.3.6 Determinação dos teores de clorofila e análise foliar

3.3.6.1. Diagnose foliar

A diagnose foliar consiste em determinar a concentração dos nutrientes nas folhas e comparar os resultados através de tabelas de interpretação, geradas pela pesquisa. Trata-se de uma ferramenta essencial para a avaliação do estado nutricional do algodoeiro e da disponibilidade de nutrientes no solo, devendo ser usada em conjunto com a análise do solo e o histórico de uso da área, visando a uma recomendação de adubação que proporcione a máxima eficiência econômica. Segundo Malavolta (1987), a folha adequada é a recém madura. Isto porque nas folhas em crescimento o teor do elemento é "diluído", enquanto que nas folhas mais velhas o teor do elemento tende a concentrar-se. Assim, para determinação dos teores foliares foi usada a recomendação de coleta da quinta folha do caule principal, contadas a partir do ápice. A tabela de comparação utilizada para o período de máximo florescimento é a recomendada por Silva e Raij, (1996), para o algodoeiro, e é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Teores adequados de nutrientes usados na interpretação dos resultados de análise da 5ª folha do algodoeiro, no estágio de máximo florescimento (SILVA e RAIJ, 1996).

N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
35 a 43	2,5 a 4,0	15 a 25	20 a 35	3 a 8	4 a 8

Para determinação dos teores de clorofila foliar e dos macronutrientes foram realizadas 20 amostragens de tecido foliar para realização de quantificação dos teores de fósforo e nitrogênio na massa seca e clorofila na massa fresca das plantas. Foram coletadas folhas do algodoeiro aos 40 DAE (estágio B₃), 60 DAE (estágio F₃), 80 DAE (estágio C₁) e 100 DAE (C₅), de acordo com a escala de Marur e Ruano (2001). As amostras vegetais foram analisadas de acordo com as recomendações de Jones Jr. et al. (1991). Para determinação do teor de P, as amostras vegetais foram submetidas à digestão nítrico-perclórica. O P foi dosado pelo método da redução do fosfomolibdato, pela vitamina C, modificado por Braga e Defelipo (1974). Para determinação do teor de N, as amostras foram submetidas a digestão sulfúrica. O N foi determinado pelo método colorimétrico de Nessler (JONES Jr. et al., 1991).

Após o 105º DAE, o suprimento de água ao algodoeiro foi retirado para redução do crescimento vegetativo e aceleração do processo de senescência.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F) e de regressão polinomial. Foram estimados os pontos de mínimo e/ou máximo das equações por meio da primeira derivada de “Y” em relação à “X”. Foi feita a análise de correlação entre o teor foliar de N e de P e a produtividade obtida, bem como estimada a data de maior consumo desses nutrientes para cada dose estudada. Foi considerado o valor de R\$ 1,00/kg de algodão em caroço e R\$ 2,00/kg de P_2O_5 .

3.3.6.2. Teores de Clorofila

Para determinação dos teores de clorofila foliar foram feitas medições no mesmo período da coleta de folhas para a diagnose foliar, utilizando-se o SPAD-502 da Minolta, mostrado na Figura 17. Foram utilizadas as fileiras 2 a 5 de cada parcela para essa medição, sendo essas fileiras usadas para todas as medições não destrutivas, realizadas desde os 40 até os 100 DAE.

Neste trabalho foram obtidos os índices do clorofilômetro SPAD, para determinação dos valores instantâneos da clorofila e sua comparação com os teores de nitrogênio foliar nos tratamentos em estudo. Assim, para efeito de validação dos valores obtidos com esse equipamento, foi determinada a equação de calibração, relacionando o índice SPAD aos valores da clorofila obtidos em laboratório com o solvente orgânico DMSO (BARNES et al., 1992), que por sua vez foram comparados aos teores foliares de nitrogênio nas mesmas amostras.

Para análise laboratorial através do DMSO, a extração da clorofila foi realizada em folhas completamente expandidas com diferentes tonalidades de cor, colhidas aos 100 DAE. Foram extraídos discos foliares com 113 mm^2 de área onde foram inicialmente realizadas as leituras do índice SPAD, sendo os mesmos discos utilizados para a extração de pigmentos. Para a determinação de nitrogênio os discos extraídos das mesmas folhas possuíam 225 mm^2 de área. A determinação do índice SPAD em cada disco foi realizada por meio da média de cinco leituras com o clorofilômetro portátil.



Figura 17. Medidor de clorofila SPAD-502 em utilização na cultura do algodoeiro, em Apodí, RN

Após as leituras com o clorofilômetro as amostras foram acondicionadas em tubos de ensaio numerados com 5 ml de Dimetil sulfóxido (DMSO). Os tubos de ensaio foram então incubados a temperatura de 70 °C (HISCOX e ISRAESTAM, 1978) por um período de 150 minutos. Após o resfriamento do extrato líquido, uma alíquota de 3 ml foi utilizada para leituras em espectrofotômetro a 470, 646 e 663 nm. A partir das leituras obtidas no espectrofotômetro determinou-se o conteúdo das clorofilas *a*, *b* e total além do conteúdo de carotenóides utilizando-se as equações propostas por Wellburn (1994).

Os valores obtidos do índice SPAD foram comparados aos teores foliares de nitrogênio para a mesma data, considerando a retirada simultânea das folhas para determinação do N foliar para todas as épocas estudadas. A partir do N foliar, foram obtidas as correlações desse teor com o índice SPAD e a produtividade, bem como foram geradas as equações entre essas variáveis, o que possibilitou a confecção de um nomograma com valores referenciais do índice SPAD que preconizam a suplementação de N para correção de possíveis deficiências desse nutriente entre os 40 e 90 DAE.

Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão, ajustando-se modelos matemáticos que apresentassem elevados coeficientes de determinação. Para gerar os modelos matemáticos utilizaram-se as leituras do índice SPAD como variável dependente e a concentração dos pigmentos extraídos pelo método clássico e N foliar como variáveis independentes.

3.3.7 Determinação da fitomassa acumulada

3.3.7.1. Fitomassa do algodoeiro no campo - Método destrutivo

As mesmas plantas de algodão que foram retiradas para determinação da área foliar através do planímetro serviram para quantificação da fitomassa verde e seca, tendo sido retiradas duas plantas representativas de cada parcela. As coletas foram realizadas aos 40, 60, 80 e 100 DAE. Das plantas coletadas foram lavadas e separadas a raiz, as estruturas frutíferas, caule e folhas, sendo então pesadas para obtenção da massa verde. Após isso as plantas foram colocadas em estufa a temperatura de 65°C, até obtenção de peso constante, e pesadas para obtenção da massa seca. Os valores da fitomassa verde e seca, além da área foliar obtidas em laboratório serviram para validação dos dados obtidos em campo através de métodos não-destrutivos como espectrorradiometria, ou estimados através de imagens de satélite.

3.3.7.2. Fitomassa do algodoeiro obtida por espectrorradiometria

As medições feitas com o espectrorradiômetro da Apogee foram realizadas por tratamento, simultaneamente ao levantamento de dados agrônômicos, a coleta de dados da estação meteorológica e a retirada de plantas para determinação da área foliar e fitomassa do algodoeiro em laboratório. Os gráficos do espectrorradiômetro foram convertidos em planilhas do

Excel para melhor discriminação dos valores nos comprimentos de onda desejados. De posse dos valores das refletâncias obtidas pelo espectrorradiômetro, foram determinados os índices de vegetação (IVs), considerando os seguintes comprimentos de onda: 800 nm (IVP), 670 nm (V), e 550nm (verde). Foram escolhidos esses comprimentos de onda por terem sido testados por Haboudane et al. (2004) que obtiveram coeficientes de determinação superiores a 0,8 para várias culturas, dentre elas o algodoeiro. Com os valores dos IVs obtidos por espectrorradiometria e o valor do IAF determinado através da área foliar obtida em laboratório (planímetro), foi possível determinar as equações preditivas do IAF e da fitomassa para cada IV estudado, tendo sido feitas as avaliações da capacidade de cada IV de estimar a fitomassa e a produtividade da cultura. Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e regressão polinomial, ajustando-se modelos matemáticos que apresentassem elevados coeficientes de determinação. Foram estimados os pontos de mínimo e/ou máximo das equações por meio da primeira derivada de "Y" em relação à "X".

3.3.7.3. Fitomassa por imagens de satélite

Para a estimativa da produção da fitomassa acumulada obtida por imagens de satélite ($Fitom_{sat}$), foram usados os mesmos IVs avaliados para determinação do IAF, quais sejam: NDVI, RDVI, TVI, MSAVI, MTVI2 e SAVI, que foram obtidos através de imagens geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5.

Foram utilizadas três imagens em fases fenológicas distintas, obtidas nos dias 01/11/2008, 17/11/2008 e 19/12/2008, correspondendo a 34, 50 e 80 DAE. Com as imagens foram obtidos os componentes dos balanços de radiação e de energia através de modelos baseados no SEBAL. De posse dos dados de Fluxo de Calor no Solo (G) (Equação 16), Fluxo de Calor Sensível (Equação 17), e do fluxo do calor latente (λE), que estão associados com as perdas evaporativas, e da radiação de onda curta incidente - R_S , fornecida no modelo SEBAL (Apêndice A), foi feito o cálculo da fração evaporativa (A), de acordo com a equação (28). Após a determinação da A , foram obtidas as cartas da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Equação 21) e da eficiência do uso da luz (Equação 28).

O valor do coeficiente de eficiência da luz foi determinado através da obtenção dos dados meteorológicos e o uso da equação (28). Todos os valores obtidos são parâmetros usados como entrada no algoritmo CASA para determinação da fitomassa, conforme apresentado nas Figuras (4) e (5). O software para tratamento das imagens e obtenção das cartas dos IVs, IAF, f_{PAR} , G , λE e A , foi o ERDAS, da Leica Geosystems.

Com os dados obtidos do balanço de energia, a fração evaporativa instantânea, que traduz as alterações devido à umidade do solo, e é considerada similar a de 24h, foi obtida da equação (29), sendo também usada para calcular a evaporação real de 24h dos fluxos instantâneos do calor latente. Assim, a fitomassa total observada através dos dados do satélite,

pode ser obtida da equação (30) vista anteriormente, fornecida em $kg\ m^{-2}$ (BRADFORD et al., 2005; BASTIAANSEN e ALI, 2003; FIELD et al., 1995), usando-se o ε' , como o valor uniformizado máximo global para o fator de eficiência do uso da luz, dado como 2,5 ($g\ MJ^{-1}$) e A é a fração evaporativa instantânea obtida através do SEBAL.

As temperaturas T_1 e T_2 estão relacionadas ao ajuste do crescimento da planta por meio da temperatura, foram obtidas por meio da temperatura média durante o mês de máxima cobertura vegetal e da média mensal da temperatura do ar durante todo o ciclo da cultura, usando as equações (31) e (32), vistas anteriormente (BRADFORD et al., 2005).

De acordo com a resposta obtida foram avaliados os índices de vegetação (IVs) e determinados aqueles que melhor se correlacionam com as características fisiológicas da planta. Foram comparados os IVs obtidos através da espectrorradiometria de campo e dos obtidos por dados de satélite, para efeito de decisão de quais IVs são mais adequados à determinação da fitomassa do algodoeiro. Os IVs testados foram escolhidos por estar entre os IVs que apresentam as melhores respostas espectrais para determinação de estresse nutricional no algodoeiro, sendo utilizados para estimativa da fitomassa em várias culturas (ZHAO et al., 2005; HABOUDANE et al., 2004; HABOUDANE et al., 2002; THENKABAIL et al., 2000; RONDEAUX et al., 1996; ROUJEAN e BREON, 1995; WIEGAND et al., 1991; MAJOR et al., 1990; HUETE, 1988).

Os dados obtidos para a fitomassa do algodoeiro foram comparados posteriormente às medidas feitas através da refletância das folhas (espectrorradiometria de banda larga e estreita) (SERRANO et al., 2000; CHRISTENSEN e GOUDRIAAN, 1993). Para avaliação da produtividade, foi avaliado o peso do capulho e quantidade de frutos por tratamento.

A influência dos índices de vegetação na fitomassa acumulada foi então avaliada com os dados obtidos via espectrorradiômetro portátil e comparados aos modelos obtidos através do algoritmo CASA, identificando-se assim os melhores índices para determinação de estresse nutricional e a produção de fitomassa do algodoeiro (BRANDÃO et al., 2006).

Após a estimativa da fitomassa e da produtividade da cultura por meio da espectrorradiometria os dados foram comparados aos obtidos no campo como forma de validar as relações obtidas. Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e regressão polinomial, ajustando-se modelos matemáticos que apresentassem os mais altos coeficientes de determinação (R^2). Foi feita a análise de correlação entre os índices de vegetação obtidos através das imagens do TM Landsat 5 com o IAF e a fitomassa do algodoeiro obtidos em campo, bem como com a produtividade alcançada.

4. Resultados e Discussão

4.1. Resposta espectral do algodoeiro e sua relação com a adubação nitrogenada e fosfatada

4.1.1 Avaliação dos teores foliares de N e P em função das épocas de amostragens

Os teores foliares de N e P variaram amplamente em função dos estágios fenológicos estudados. Foi observado efeito quadrático para todos os nutrientes, conforme pode ser visto nas Figuras 18 e 19.

O teor foliar de N variou de 28,9 a 51,3 g kg⁻¹. O maior pico de absorção deste nutriente foi observado no início do florescimento, caracterizado como o estágio fenológico B₁ - B₃, avaliado aos 40 (DAE), enquanto que o menor teor ocorreu aos 100 DAE, período caracterizado pelo início da abertura dos capulhos, denominado como estágio fenológico C₅. O N é um nutriente móvel na planta, que tende a se concentrar nos tecidos jovens e a diluir sua concentração com o tempo, devido à estabilização do crescimento do tecido, ao aumento de carboidratos e lipídios e, especialmente, por causa da redistribuição para os frutos e partes jovens da planta ainda em crescimento (MARSCHNER, 1995).

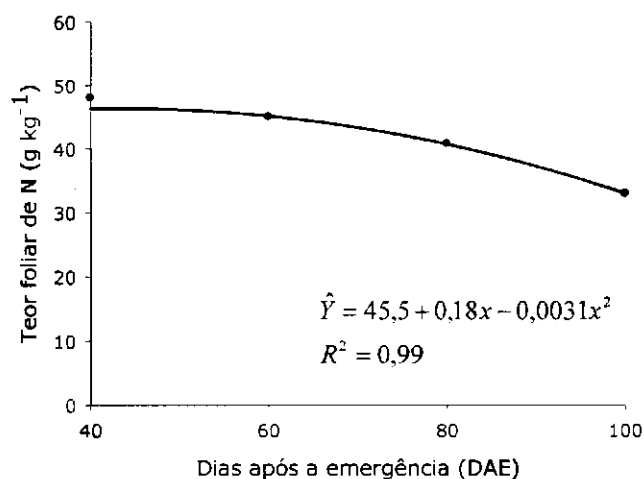


Figura 18. Teor foliar de N em plantas de algodão em função das épocas de amostragens.

O N seguiu o modelo polinomial quadrático, obtendo-se o ponto de máximo aos 43,7 dias. Os teores foliares desse nutriente encontram-se na faixa de suficiência observada por Yamada et al. (1999), considerados adequados para lavouras de algodão de alta produtividade, que é de 40-45 g kg⁻¹. Seu fornecimento em quantidades adequadas estimula o crescimento, o florescimento,

regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento, a resistência da fibra e o índice de micronaire (SILVA, 1999; CARVALHO et al., 2007).

Quanto ao P, observou-se uma variação ampla dos teores foliares deste nutriente ao longo das épocas de amostragem (2,04 a 2,84 g kg⁻¹), constatando-se através da equação apresentada na Figura 19 que o ponto de mínimo ocorreu aos 74 DAE.

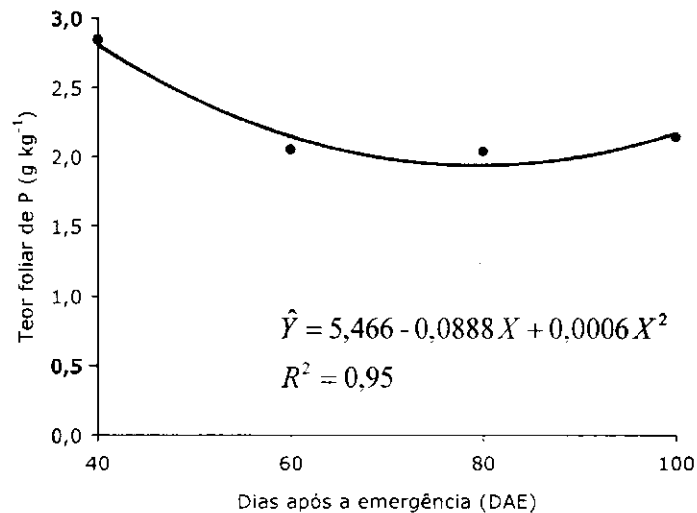


Figura 19. Teor foliar de P em plantas de algodão em função das épocas de amostragens.

Nesse período, as plantas encontravam-se em pleno florescimento e formação das primeiras maçãs, caracterizado como o estágio F₅ segundo a escala de Marur e Ruano (2001). De acordo com a literatura, para lavouras de alta produtividade, amostradas no período do máximo florescimento, são considerados teores adequados de P aqueles situados entre 2,5 a 4,0 (SILVA e RAIJ, 1996). Embora tendo sido aplicadas grandes quantidades de fósforo, no período de pleno florescimento as plantas apresentaram teores foliares para esse nutriente um pouco menores que o recomendado para lavouras de algodoeiro do Centro-oeste do país, mas não apresentaram sintomas de deficiência. O fósforo é um nutriente de alta demanda pelo algodoeiro, pois estimula o crescimento radicular, florescimento e desenvolvimento dos frutos. Ao contrário do N, que prolonga a fase vegetativa das plantas, o fósforo favorece a maturação dos capulhos, aumenta o rendimento e a qualidade da fibra (FREIRE, 2007; MOZAFFARI et al., 2005). O fósforo é acumulado nas folhas mais jovens e tende a ter sua concentração reduzida pela redistribuição para os frutos, onde é acumulado como fitato. Seu teor também é diminuído pela menor atividade radicular durante o período de intenso crescimento dos frutos, que são drenos preferenciais de carboidratos. Cessada a pressão do pico de desenvolvimento dos frutos, os teores tendem a se recuperar, porém em níveis menores dos alcançados anteriormente, possivelmente pela maior concentração de outros componentes das células maduras e pela continuada redistribuição para os frutos.

A variação sazonal diferenciada dos nutrientes propicia alteração nos teores e nos valores de suas relações e podem provocar interpretações incorretas nos índices de avaliação do estado

nutricional, baseados tanto no limite de suficiência como nos índices DRIS. Desde modo, fica claro que a condição padrão ou valores de "normas" para comparação e tomada de decisão sobre a deficiência ou toxidez do nutriente na planta precisa ser estabelecida para cada período fenológico do desenvolvimento da cultura sob pena de não serem válidos.

4.1.2 Teores de macronutrientes no tecido foliar em função da adubação nitrogenada e fosfatada

Para obtenção de uma boa produtividade o algodoeiro necessita, além de uma boa genética, condições ambientais adequadas para seu pleno desenvolvimento. A absorção de nutrientes está intimamente relacionada às condições climáticas e, principalmente, à fisiologia da planta. De acordo com a fase predominante da cultura encontram-se demandas e balanços específicos dos nutrientes requeridos.

A construção da fertilidade do solo é uma poderosa ferramenta de diminuição de riscos. A análise foliar aliada à análise do solo permite avaliar com maior eficiência o estado nutricional da lavoura. A faixa crítica de referência para a interpretação dos resultados de análise foliar varia com as condições climáticas, manejo e tipo de solo, disponibilidade de água e nutrientes, interação entre os nutrientes, idade da cultura, volume e eficiência do sistema radicular, histórico da área de cultivo, ataque de pragas e doenças, uso de defensivos ou fertilizantes foliares e outras práticas de manejo que influenciam a composição mineral dos tecidos vegetais (MARTINEZ et al., 1999).

Segundo Carvalho e Ferreira (2006), o algodoeiro extrai cerca de 247 kg ha⁻¹ de N, 91 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 260 kg ha⁻¹ de K₂O para obtenção de uma produtividade média de 3.560 kg ha⁻¹ de algodão em caroço no Cerrado da Bahia. Para cada 1.000 kg de algodão em caroço produzidos, são exportados 50,9, 18,5, 33,0, 6,0, 21,0 e 5,1 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, CaO, MgO e S, respectivamente (CARVALHO e FERREIRA, 2006), ou seja, a maior parte dos nutrientes extraídos permanecem no campo como constituinte de ramos, folhas e cascas de frutos, exceto para o nitrogênio, cuja maior parte é exportada pelas sementes do algodão, que são ricas em proteína.

Por outro lado, para que ocorra pleno aproveitamento dos nutrientes aplicados ao solo, é necessário que a planta esteja sem estresse hídrico. A resposta da planta a determinada dose de nutriente depende principalmente da disponibilidade de água no meio e do seu manejo (REICHARDT e TIMM, 2004). O déficit hídrico em determinadas fases fenológicas da planta pode comprometer o rendimento e a qualidade da fibra e promover a queda de botões florais e maçãs jovens, em virtude da floração e frutificação serem os estágios fenológicos mais sensíveis ao estresse hídrico (LUZ et al., 2002). Em condições irrigadas, o potencial produtivo da cultura aumenta e, com ele, crescem a extração e a necessidade de aplicação de nutrientes.

A aplicação de doses de N e P₂O₅ na fertilização do algodoeiro propiciou resposta quadrática para os teores foliares de N, P, K e S, observando-se efeitos isolados da adubação

nitrogenada para N, K e S, e da adubação fosfatada para P e S, não se observando efeitos interativos da adubação, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo das análises de variâncias dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S no tecido foliar de plantas do algodoeiro fertilizadas com N e P.

F.V.	G.L.	Quadrados Médios					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	2	63,34	0,06	16,35	94,98	0,11	4,44
N	3	683,97**	0,22	34,21*	76,42	0,60	22,47*
P	3	16,75	1,65**	33,18	109,17	1,05	8,99*
NxP	9	21,47	0,11	10,43	55,59	1,03	2,61
Resíduo	30	20,44	0,68	8,90	98,69	0,79	2,19
CV (%)	-	12,87	12,87	16,35	26,43	15,68	54,51

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

Na Figura 20 observa-se que a adubação nitrogenada promoveu efeito quadrático sobre o teor foliar de N que variou de 26,98 a 43,71 g kg⁻¹. O maior teor foliar observado para esse nutriente ocorreu aos 216,6 kg ha⁻¹ de N. De acordo com Silva e Rajj (1996), os teores foliares desse nutriente são considerados adequados para o algodoeiro no estágio de máximo florescimento, que vão de 35 a 43 g kg⁻¹. A elevada dose necessária para obtenção do maior teor foliar desse nutriente pode ser explicada pelo baixo valor de matéria orgânica no solo, uma vez que cerca de 5% da matéria orgânica existente é constituída por nitrogênio, cuja forma orgânica perfaz 94 a 96% do N total, ficando o restante para as formas inorgânicas (NO₃⁻ e NH₄⁺), que são absorvidas pelas plantas (REICHARDT e TIMM, 2004).

Em experimentos conduzidos no estado de Goiás, Carvalho et al. (2008) observaram que as lavouras com teores foliares de N entre 37 a 45 g kg⁻¹ de massa seca estão bem nutridas para produzir até 5.000 kg ha⁻¹ de algodão em caroço. Porém, para obtenção de produtividade acima desse valor, a concentração de N na folha deve ser mais elevada, variando de 45 a 50 g kg⁻¹ de massa seca.

O potássio também seguiu o modelo polinomial quadrático em resposta a aplicação de N. A adição de doses crescentes de nitrogênio propiciou variação nos teores foliares de 15,80 a 19,69 g kg⁻¹ de K, que são valores considerados adequados por Silva e Rajj (1996), para o algodoeiro em máximo florescimento (15 a 25 g kg⁻¹). Pode-se verificar na equação fornecida na Figura 20(b) que o maior teor foliar desse nutriente foi observado aos 215 kg ha⁻¹ de N. Em geral, o potássio circula dentro da planta pelo xilema e floema, favorecendo a neutralização de cargas negativas de ânions orgânicos ou minerais presentes no simplasto, a absorção e translocação de nitrato, a translocação de sacarose dentro da planta e o controle na planta da absorção e translocação total de nutrientes. Em condições de pH > 5,5 a atividade nitrificadora é muito intensa e grande parte do nitrogênio aplicado como uréia é mineralizado para amônio e deste para nitrato, que é absorvido pelas raízes da planta. A absorção de nitrato favorece a de potássio (MARSCHNER, 1995), o que justifica sua maior absorção com a elevação das doses de nitrogênio aplicada ao solo. É importante destacar que o teor de potássio na folha é fortemente influenciado

por sua idade e pelo estágio fisiológico da planta. Assim, os teores foliares de K no algodoeiro tendem a aumentar com a idade da planta até a terceira semana após o florescimento. Após essa fase o requerimento de potássio é superior a capacidade de absorção pelas raízes, de modo que o teor foliar desse nutriente tende a diminuir devido a translocação das folhas para redistribuição nos frutos (ROSOLEM, 2007).

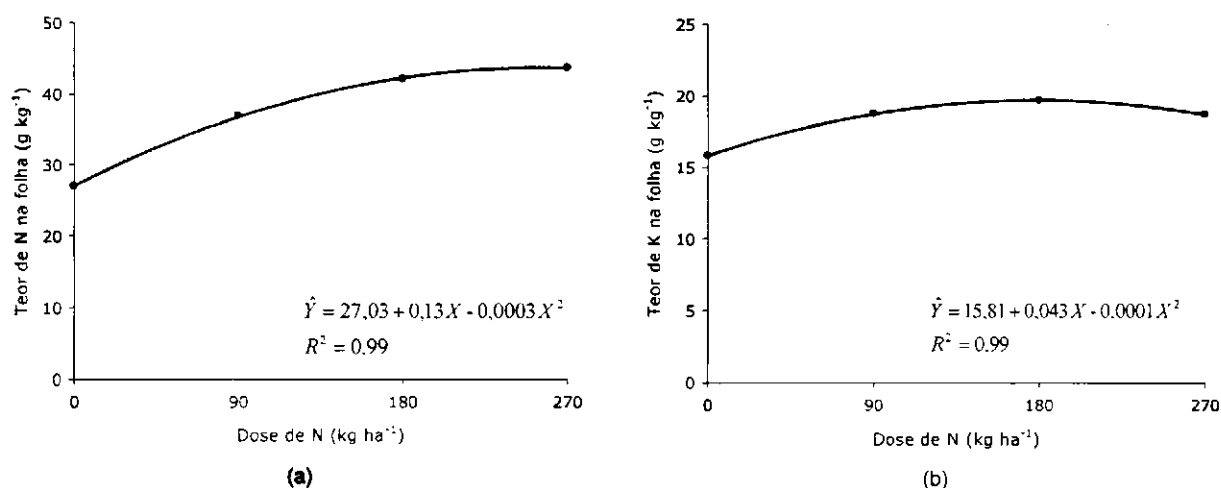


Figura 20. Teores foliares de N (a) e K (b) no algodoeiro em resposta a adubação nitrogenada.

O enxofre variou de 1,57 a 4,68 g kg⁻¹, exibindo comportamento quadrático, com redução a cada incremento das doses de N até o ponto de mínimo observado quando aos 200 kg ha⁻¹. Por outro lado, o solo apresentava baixo teor de matéria orgânica, que é a principal fonte de enxofre e nitrogênio no solo. Em geral, a demanda por enxofre aumenta sob condição irrigada, especialmente se altas doses de NPK forem fornecidas à planta, pois as proteínas estruturais da planta têm aminoácidos sulfurados. A irrigação também tende a deslocar parte do enxofre solúvel na solução da camada arável para as maiores profundidades do solo. Além disso, pode haver tendência de menor crescimento radicular das plantas bem supridas de N e P, bem como menor absorção de sulfato na presença de maiores teores de nitrato e fosfato, pois todos competem pelos mesmos sítios de absorção ativa na membrana plasmática (MARSCHNER, 1995). O resultado conjunto desses fatores é a redução dos teores de enxofre na planta à medida que se aumenta as doses de nitrogênio e fósforo no solo e ocorre o acréscimo de seus teores nos tecidos foliares da planta (ROCHESTER, 2009).

A adubação fosfatada propiciou condições adequadas quanto ao fornecimento de P e S às plantas (Figura 21). Observou-se que os teores foliares de P variaram entre 1,51 a 2,30 g kg⁻¹, constatando-se que o maior teor foliar para esse nutriente ocorreu quando se aplicou 357 kg ha⁻¹ de P₂O₅. De acordo com a literatura, para lavouras de alta produtividade, no máximo florescimento são considerados teores adequados de P da ordem de 2,5 a 4,0 g kg⁻¹ (SILVA e RAIJ, 1996). Apesar das altas doses escolhidas para esse trabalho, os teores foliares de P observados nesta pesquisa encontram-se abaixo da faixa ótima mencionada acima. Isso pode ser explicado

considerando-se que os solos do semiárido têm pH elevado e são altamente ricos em cálcio, além de apresentar alta afinidade pelo fósforo. Nesta condição, parte do fósforo aplicado é precipitado como fosfato tricálcico, que não é absorvido pelas plantas, reduzindo os teores disponíveis e, conseqüentemente, o acúmulo na folha. É possível que esse fator tenha limitado a obtenção de maior produtividade do algodoeiro, por ocasionar deficiência crônica nas plantas. A adubação em área total e a aplicação de produto acidificante, como o enxofre elementar, poderia reduzir o pH e aumentar a solubilidade do fosfato de cálcio, elevando a disponibilidade do nutriente e possivelmente a produtividade.

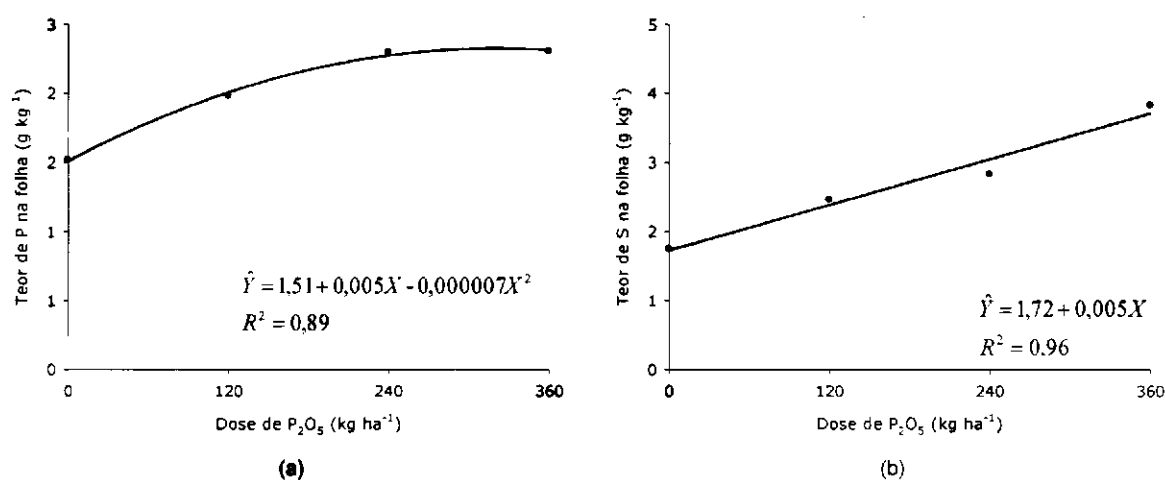


Figura 21. Teores foliares de P (a) e S (b) em plantas de algodão em resposta a adubação fosfatada.

O algodoeiro extrai pequena quantidade de enxofre do solo, que varia de 4 a 8 kg para cada tonelada de algodão em caroço produzida, dos quais cerca de 60% são exportados pelas sementes e fibras. O S apresentou comportamento linear com teores variando de 1,74 a 3,82 $g\ kg^{-1}$ em resposta a aplicação de fósforo. A cada incremento na dose de P_2O_5 observou-se aumento no teor foliar deste elemento, provavelmente por maior deslocamento de sulfato adsorvido na superfície das argilas, em troca pelo íon fosfato, que poderia elevar a concentração na solução do solo e sua subsequente absorção; e, ou, pelo estímulo a uma maior atividade de H^+ -ATPase na membrana plasmática devido ao aumento de fósforo nas células das raízes, com conseqüente aumento da absorção ativa de sulfato. De acordo com Yamada et al. (1999), são considerados adequados teores de S da ordem de 4 a 6 $g\ kg^{-1}$. É possível que o baixo teor de matéria orgânica do solo e a maior lixiviação do SO_4^{2-} , provocado pela irrigação, tenha reduzido a disponibilidade de sulfato no solo e impedido a planta de absorver maiores quantidades de nutrientes. Nessas condições, a aplicação de 30 $kg\ ha^{-1}$ de S, especialmente como enxofre elementar para baixar o pH, é essencial para garantir o adequado estado nutricional em S no algodoeiro. Nesse caso, a resposta do algodoeiro ao enxofre torna-se muito provável. Embora não se disponham de resultados específicos, a aplicação anual de 25 a 30 $kg\ ha^{-1}$ de S deve prevenir o aparecimento de deficiência (ROSOLEM, 2001).

4.1.3 Efeito da adubação fosfatada sobre os teores foliares de P e a produtividade do algodoeiro

Os teores foliares de P durante as diferentes fases fenológicas da cultura variaram em função das doses aplicadas, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 22).

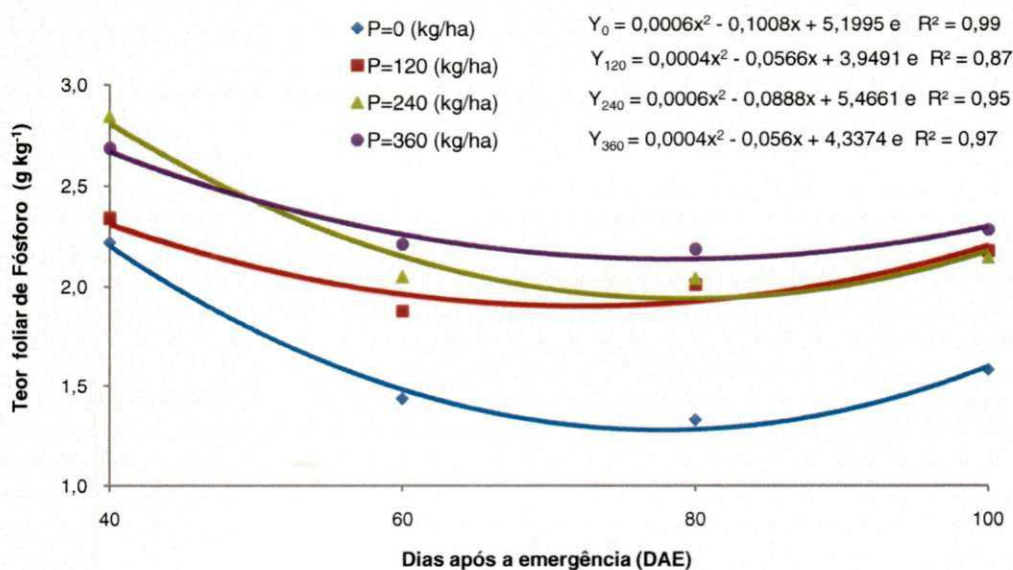


Figura 22. Teores foliares de P no algodoeiro irrigado, em diferentes estádios fenológicos.

Os maiores teores foliares foram obtidos aos 329 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e os menores na ausência da adubação fosfatada. De forma geral, para todas as doses de P₂O₅ aplicadas, os maiores teores foliares foram verificados no início da formação dos botões florais aos 40 DAE. Em geral, o pico de absorção desse nutriente ocorre durante o florescimento e enchimento das maçãs, período em que ele é absorvido numa taxa de 0,3 a 0,6 kg de P/ha/dia pelo algodoeiro (CRC, 2008). É importante destacar que o teor de P na folha é fortemente influenciado pelo estágio fisiológico da planta. Os teores de P na folha do algodoeiro se reduzem gradativamente até a formação completa das maçãs, tendendo a recuperar-se após essa fase, conforme apresentado na Figura 22. As plantas que receberam doses de P₂O₅ acima de 240 kg ha⁻¹ apresentaram teores foliares adequados aos 80 DAE, indicando a necessidade de correção dos solos do semiárido.

Em geral, à medida que os frutos crescem, maiores quantidades de carboidratos e de fósforo são dirigidos e, ou, redistribuídos para os frutos, provocando diminuição dos teores foliares do elemento e redução da atividade de absorção de nutrientes. Como as raízes do algodoeiro continuam crescendo até os 120 dias do plantio e a força do dreno de fósforo na folha cai após o pico de enchimento dos frutos, em condições normais de teores no solo, há uma ligeira recuperação dos teores foliares, quase sempre insuficiente para alcançar os níveis obtidos nos estádios mais jovens da planta, porém acima dos mínimos necessários para manter as atividades vitais da planta, sua fotossíntese, respiração e biossíntese dos demais compostos necessários ao

metabolismo. O fósforo é um nutriente de alta mobilidade no floema, sendo retranslocado da fonte (folhas) para as estruturas reprodutivas, o que explica esse comportamento.

Como pode ser observado da Figura 22, os teores foliares de P apresentaram redução desde o estágio inicial até o estágio C₁ (aproximadamente 74 DAE), momento em que os primeiros capulhos começaram a se abrir. Os teores foliares de P do tratamento sem adubação fosfatada apresentaram redução até os 84 DAE, caracterizado como o início do estágio C₅. O aumento nas doses de P propiciou o acúmulo desse nutriente nas folhas após o enchimento das maçãs, principalmente quando se utilizou a dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Apesar dos teores foliares no estágio de pleno florescimento só terem ultrapassado o mínimo recomendado pela literatura apenas com a dose máxima de fósforo, não foram observados sintomas de deficiências nas plantas com doses superiores a 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Por outro lado, as plantas que não receberam adubação fosfatada, mesmo com as doses máximas de N, apresentaram redução do crescimento, amarelecimento das folhas mais velhas e senescência precoce.

Foi observado que os teores foliares desse nutriente acompanharam a produtividade, com alto índice de correlação, variando de 0,85 a 0,99, nos diferentes estádios fenológicos estudados, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Correlação entre produtividade e teor foliar de fósforo no algodoeiro em diferentes estádios fenológicos.

	40 DAE	60 DAE	80 DAE	100 DAE
Correlação entre produtividade e teor foliar de P	0,85** ⁽¹⁾	0,99***	0,99***	0,98**

** , *** significativo a 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste t. ⁽¹⁾ com quatro pares de médias comparadas.

A produtividade de algodão em caroço aumentou significativamente com o incremento das doses de fósforo fornecidas pela adubação (Figura 23). Observa-se que a resposta do teor de nutriente na folha seguiu paralela à de produtividade, com maior distanciamento apenas na primeira época de amostragem. Isso ocorreu provavelmente devido ao crescimento intenso da planta aos 40 DAE não permitir o aumento rápido dos teores de fósforo nas células da folha, diluindo-os. Entretanto, exceto na amostragem realizada aos 60 DAE, a dose de fósforo necessária para a planta alcançar seu máximo rendimento foi sempre superior àquela necessária para o alcance do teor máximo no tecido, o que permite observar que a otimização dos processos produtivos se dá somente após a saturação do teor do nutriente na planta. Nesta condição, os processos metabólicos dependentes de fósforo atuam no seu máximo favorecendo o aumento da produtividade da cultura.

Embora o maior teor de fósforo nas folhas tenha sido verificado quando se aplicou a dose máxima de P₂O₅ estudada, doses menores se mostraram eficientes, com alta produção, indicando que as quantidades foram adequadas para a nutrição da planta.

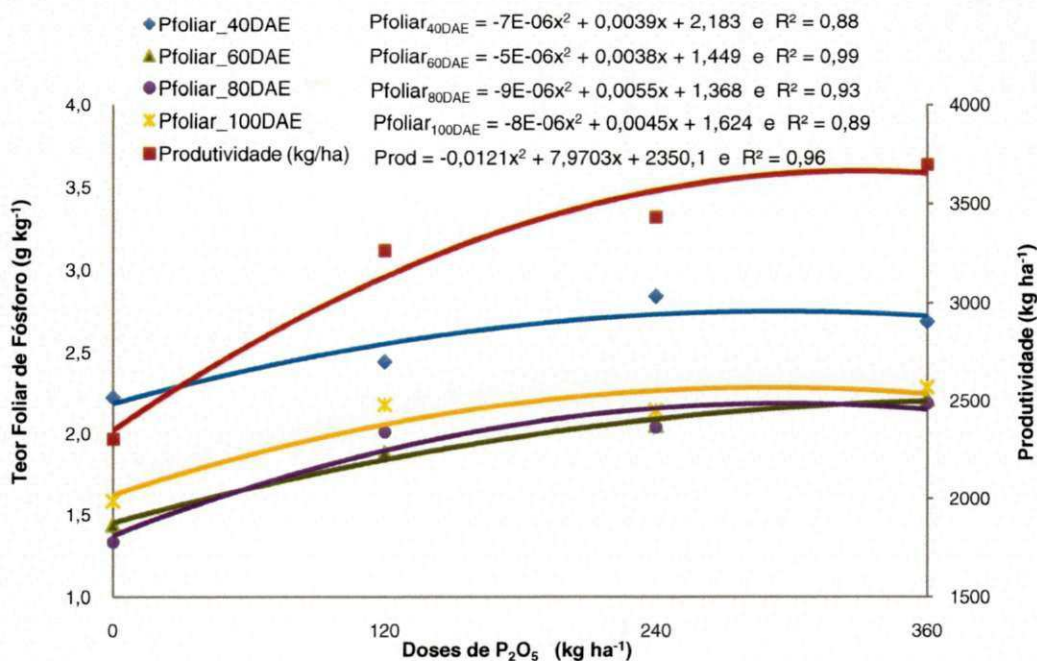


Figura 23. Teores foliares de P e produtividade de algodão em caroço em resposta a adubação fosfatada.

Os teores foliares de P aumentaram significativamente em função das doses de P_2O_5 aplicadas, independentemente do estágio fenológico da cultura (Figura 23). Pode-se observar das equações apresentadas nessa figura que aos 40 DAE o teor máximo de P foliar foi de $3,29 \text{ g ha}^{-1}$ correspondendo a 278 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Por outro lado, no estágio de máximo florescimento (80 DAE), observou-se que o teor máximo foliar foi de $2,59 \text{ g ha}^{-1}$, obtido com 305 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Aos 100 DAE, o teor máximo de P foi de $2,50 \text{ g ha}^{-1}$, obtido aos 281 kg ha^{-1} de P_2O_5 .

A adubação fosfatada propiciou condições adequadas para aumentar a produção de algodão em caroço até a dose de 329 kg ha^{-1} de P_2O_5 , quando a produtividade foi de aproximadamente $3.669,31 \text{ kg ha}^{-1}$, gerando um incremento de 59,14% em relação à ausência de fertilização fosfatada. No tratamento sem adubação fosfatada, a produtividade do algodoeiro foi de aproximadamente $2.305,67 \text{ kg ha}^{-1}$, como apresentado na Figura 23.

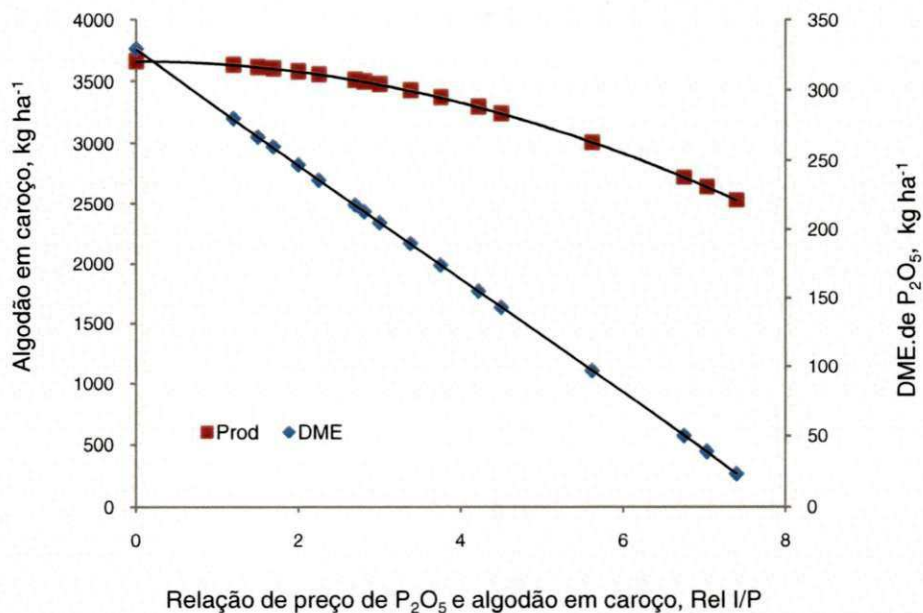
Em geral, o P é um dos nutrientes aplicados em maiores quantidades nas adubações, embora seja extraído em menores quantidades pelas culturas, se comparados a outros macronutrientes, pois a recuperação do fósforo fornecido na adubação é muito baixa, inferior a 35% da quantidade aplicada. Isso pode ser explicado pelo fato de que o P é um elemento que apresenta alta afinidade por outros elementos, ocorrendo precipitação de fosfatos solúveis em compostos insolúveis de Ca, Fe e Al e a adsorção na superfície dos óxidos hidratados de Fe e Al, minerais abundantes na fração argila da maioria dos solos (CARVALHO et al., 2008).

O fósforo é acumulado nas folhas mais jovens e tende a ter sua concentração reduzida pela redistribuição para os frutos, onde é acumulado como fitato, que é uma classe de compostos de ocorrência natural formados durante o processo de maturação de sementes. Seu teor também é diminuído pela menor atividade radicular durante o período de intenso crescimento dos frutos, que são drenos preferenciais de carboidratos.

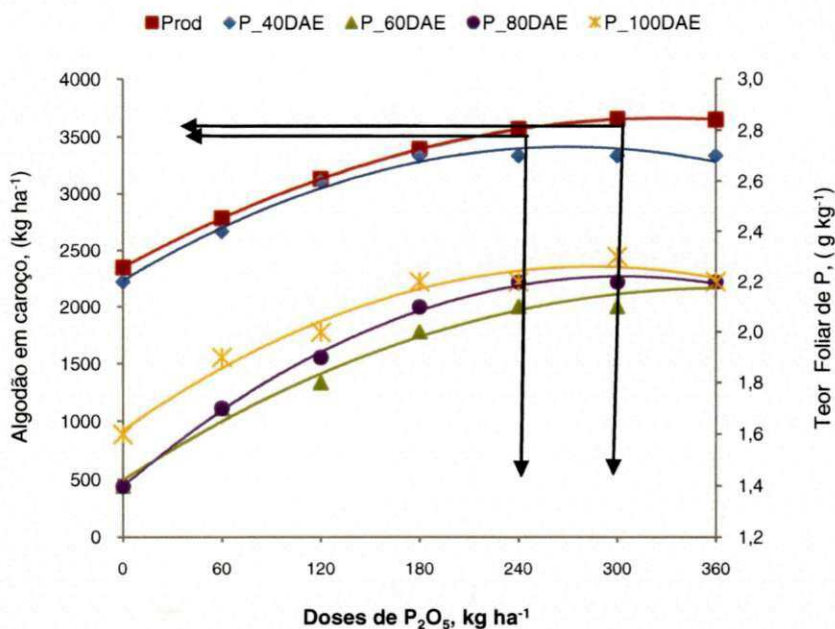
A dose de máxima eficiência econômica (DME) a ser recomendada varia de 0 a 329 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na dependência da relação Insumo (R\$/kg de P₂O₅)/Produto (R\$/kg de algodão em caroço) (Figura 24).

$$\text{Prod} = -20,661(I/P)^2 + 4E-12(I/P) + 3662,6, R^2 = 0,99$$

$$\text{DME} = -41,322(I/P) + 329,35, R^2 = 0,99$$



(a)



(b)

Figura 24. (a) Variação da dose de máxima eficiência econômica (DME) e da produtividade em função da relação insumo/produto. (b) Calibração dos teores foliares de fósforo em diferentes épocas de amostragem em função das doses de fósforo aplicadas e produtividades obtidas.

Para a relação Insumo/Produto igual a dois, a DME é de 247 kg ha⁻¹ e a produtividade estimada é de 3.581 kg ha⁻¹. Nessa condição, os teores de 2,71 a 2,72, 2,08 a 2,16, 2,18 a 2,20 e 2,24 a 2,25 g kg⁻¹ aos 40, 60, 80 e 100 DAE são considerados adequados para obtenção das maiores produtividades na cultura do algodão irrigado no semiárido nordestino, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Dose de máxima eficiência econômica e física, teores foliares em diferentes épocas de amostragem e produtividade de algodão em caroço sob cultivo irrigado.

Doses de P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	Época de amostragem, DAE				Produtividade kg ha ⁻¹
	40	60	80	100	
247 ⁽¹⁾	2,72	2,08	2,18	2,25	3.581 ⁽³⁾
329 ⁽²⁾	2,71	2,16	2,20	2,24	3.699 ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Dose de máxima eficiência econômica e ⁽²⁾ física ⁽³⁾ Produtividade de máxima eficiência econômica e ⁽⁴⁾ física.

4.1.4 Efeito da adubação nitrogenada sobre os teores foliares de N e a produtividade do algodoeiro

O gerenciamento da adubação nitrogenada é uma das práticas mais importantes para obtenção de altas produtividades nos sistemas de produção de algodão. Tanto a deficiência como o excesso de nitrogênio (N), influencia negativamente o crescimento da planta, a retenção de frutos, a qualidade da fibra e a produtividade (REDDY et al., 2004; BOGGS et al., 2003; GERIK et al., 1998). O fornecimento insuficiente de N resulta frequentemente em uma redução da área foliar e conseqüentemente menor capacidade fotossintética e menor produção de fitomassa, resultando em má qualidade de fibra e redução da produtividade (REDDY et al., 2004; ZHAO e OOSTERHUIS, 2001). Entretanto, a produtividade do algodoeiro irrigado não tem crescimento contínuo, mesmo com o aumento constante da adubação nitrogenada, devido ao crescimento vegetativo abundante, que é limitante à luz em densas camadas de folhas, aumentando a abscisão dos frutos, reduzindo a produtividade e qualidade da fibra (HUTMACHER et al., 2004).

O monitoramento do status do nitrogênio em uma cultura é um pré-requisito para a aplicação de fertilizante com precisão temporal. Técnicas frequentemente utilizadas para determinação do teor de N foliar são destrutivas e realizadas por análise química de amostras de tecido, com altos custos laboratoriais, sem contar com o tempo gasto para sua realização. Métodos não destrutivos têm sido desenvolvidos para monitoramento do N foliar. Dentre esses métodos estão as medições feitas através de clorofilômetros portáteis, que têm sido preconizados, como uma forma alternativa de avaliar a deficiência de N em algumas culturas e possivelmente indicar até a quantidade desse nutriente a ser aplicada em cobertura ou via fertirrigação, de modo mais rápido que o convencional.

A adubação nitrogenada promoveu aumento significativo nos teores foliares de N, seguindo o modelo polinomial quadrático variando entre 37,25 a 49,77 g kg⁻¹ na amostragem realizada aos 40 DAE, enquanto que aos 60 DAE variou de 33,23 a 47,86 g kg⁻¹, como pode ser observado na Figura 25. Os maiores teores foliares observados para esse nutriente nessas épocas ocorreram com 183,33 kg ha⁻¹ e 266,67 kg ha⁻¹ de N aos 40 e 60 DAE, respectivamente.

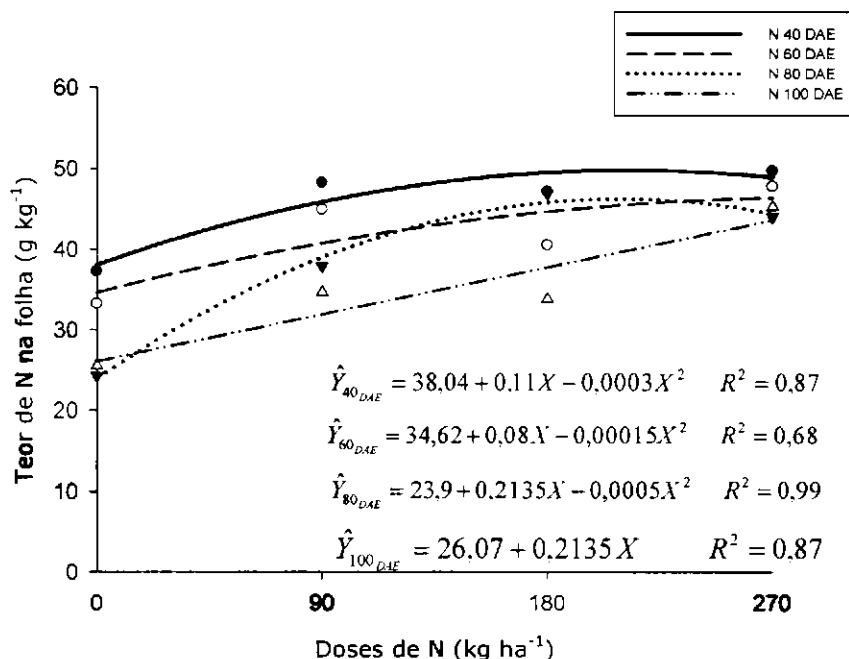


Figura 25. Teores foliares de N em resposta à adubação nitrogenada determinados em plantas de algodão amostradas aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE).

De forma similar ao observado nas amostragens aos 40 e 60 DAE, os teores foliares de N aumentaram gradativamente com o incremento das doses de nitrogênio aplicadas, constatando-se teores variando entre 24,26 a 46,93 g kg⁻¹, na amostragem realizada aos 80 DAE. Com exceção do tratamento testemunha, estes valores encontram-se dentro da faixa de suficiência, segundo critérios estabelecidos por Silva e Raji (1996), para o algodoeiro no estágio de máximo florescimento, que variam entre 35 a 43 g kg⁻¹. Resultados similares foram obtidos por Motomiya et al. (2009), os quais constataram teores de N na faixa de 34,66 g kg⁻¹, no tecido foliar de plantas do algodoeiro em pleno florescimento.

Observa-se nas três primeiras épocas de amostragem que há um incremento nos teores foliares de N com o aumento da dose de fertilizante nitrogenado até a dose de 180 kg ha⁻¹, apresentando tendência a estabilização a partir desta dose. Na amostragem realizada aos 100 DAE verificou-se resposta linear entre a adubação nitrogenada e o índice SPAD (Figura 26).

A medida que a folha envelhece, aumentam seus teores de lignina, celulose e de carboidratos, e diminuem a proporção relativa de protoplasma. Ou seja, com o envelhecimento da planta e início da senescência o teor de N na folha tende a diminuir.

Pode se-observar que com a aplicação da dose de 180 kg ha⁻¹ de N o algodoeiro estava plenamente suprido com nitrogênio, uma vez que algumas pesquisas relatam que plantas de algodoeiro com teores foliares de N entre 37 a 45 g kg⁻¹ estão bem nutridas para produzir até 5.000 kg ha⁻¹ de algodão em caroço (CARVALHO et al., 2008).

As relações entre as doses de N aplicadas em cobertura e o índice SPAD estão apresentadas na Figura 26. Observa-se que nas avaliações realizadas aos 40, 60 e 80 DAE, houve resposta quadrática, apresentando coeficientes de determinação de 0,92, 0,81 e 0,99, respectivamente. Na última leitura, realizada aos 100 DAE, o efeito da adubação nitrogenada nas leituras SPAD se ajustou ao modelo linear, com R² = 0,87.

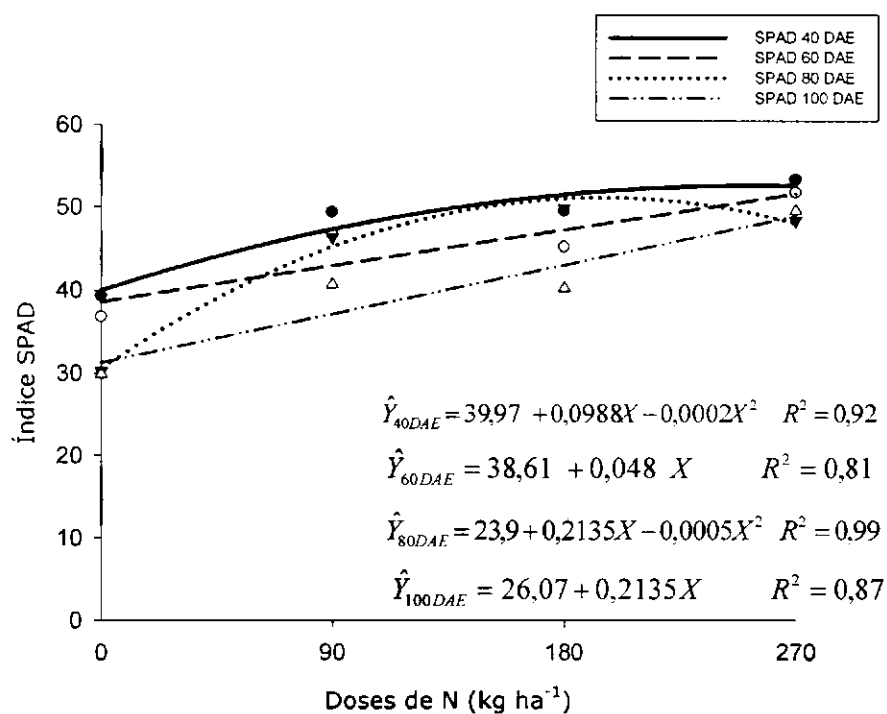


Figura 26. Índice SPAD em função da adubação nitrogenada, determinados em plantas de algodão aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE).

A utilização de N pelas plantas é maior durante os estádios de maior crescimento vegetativo, o que explica o alto coeficiente de determinação obtido no período de pleno florescimento, aos 80 DAE. Segundo Schröder et al. (2000) as leituras do SPAD não são boas preditoras do excesso de N porque quando a disponibilidade desse nutriente é alta, nem todo o N é convertido em clorofila. Entretanto, na ocorrência de deficiência, esta é imediatamente refletida como baixa concentração de clorofila, a qual é medida com precisão pelo SPAD. Os índices do

clorofilômetro variaram de 39,30 a 53,25; 36,79 a 51,71; 30,21 a 49,88 e 29,86 a 49,54, aos 40, 60, 80 e 100 DAE, respectivamente. Esses dados indicam a tendência de redução do teor foliar de N, que ocorre com o crescimento da planta. Segundo Oosterhuis (2001), durante o ciclo do algodoeiro são necessários de 50 a 300 kg ha⁻¹ de N, dependendo da produtividade pretendida, visto que grande parte do nitrogênio disponível na planta vai para a formação dos frutos durante o desenvolvimento das maçãs, havendo redistribuição do N restante para outras partes da planta. Assim, o decréscimo observado no índice SPAD nas épocas de avaliação, comprova a redução da disponibilidade de N foliar de acordo com o desenvolvimento dos frutos. Na literatura foram reportados picos diários de consumo de N em torno de 0,6 a 5,7 kg/ha/dia em condições de sequeiro, e de 1,5 a 4,6 kg/ha/dia em condições irrigadas.

Para estimativa das doses de fertilizantes é importante o conhecimento das quantidades totais de nutrientes absorvidos pelo algodoeiro, que, associado aos resultados de análises de solo e ao histórico de adubação, permite uma estimativa adequada do que a planta necessita para obtenção de altas produtividades. De acordo com Rosolem (2001), após a emissão dos primeiros botões florais até a abertura dos primeiros capulhos, o algodão eleva consideravelmente sua marcha de absorção de nutrientes, onde para N a absorção é em média de 2,5 a 3,6 kg/ha/dia. Assim, a deficiência de N, no início do estágio de florescimento, permite a tomada de decisão em tempo hábil da necessidade de suplementação desse nutriente garantindo as condições adequadas para obtenção de altas produtividades. Dessa forma, a avaliação dos teores foliares, quando realizada em campo através do clorofilômetro portátil, pode ser útil para essa rápida resposta.

O índice SPAD apresentou elevada correlação com os teores foliares de N e com a produtividade, conforme apresentado na Tabela 9. Os coeficientes de correlação observados entre o índice SPAD e os teores foliares de N, mantiveram-se elevados em todos os estágios fenológicos, variando entre 0,92 e 0,99, mostrando grande potencial para substituição das análises químicas realizadas em laboratório. Enquanto a correlação entre o teor foliar de N e a produtividade variou de 0,65 a 0,99 (Tabela 9), a correlação entre índice SPAD e a produtividade variou de 0,88 a 0,98.

Tabela 9. Análise de correlação simples entre as variáveis dependentes, índice SPAD, N foliar e produtividade estimada de algodão em caroço, nos quatro estágios fenológicos que determinaram as épocas de avaliação.

Variáveis	Índice SPAD**				Teor foliar de N			
	40 DAE	60 DAE	80 DAE	100 DAE	40 DAE	60 DAE	80 DAE	100 DAE
Teor foliar de N	0,99	0,92	0,98	0,99				
Produtividade	0,95	0,89	0,98	0,88	0,93	0,65	0,99	0,81

(*) Todos os valores obtidos foram significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t.

Considerando-se a alta correlação do índice SPAD com os teores foliares de N na folha do algodoeiro, foi possível obter modelos matemáticos que estimem os teores foliares de N por meio

do índice SPAD obtido em campo. As relações entre os teores foliares de N e o índice SPAD seguiram tendência linear para todas as épocas de amostragem, com altos coeficientes de determinação, os quais variaram de 0,95 a 0,99, conforme apresentado na Figura 27.

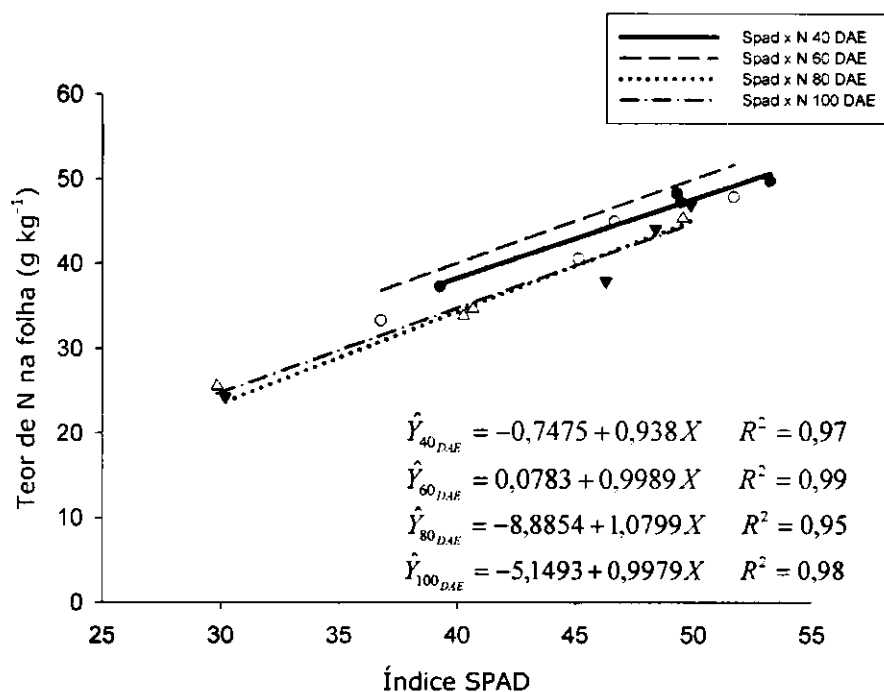
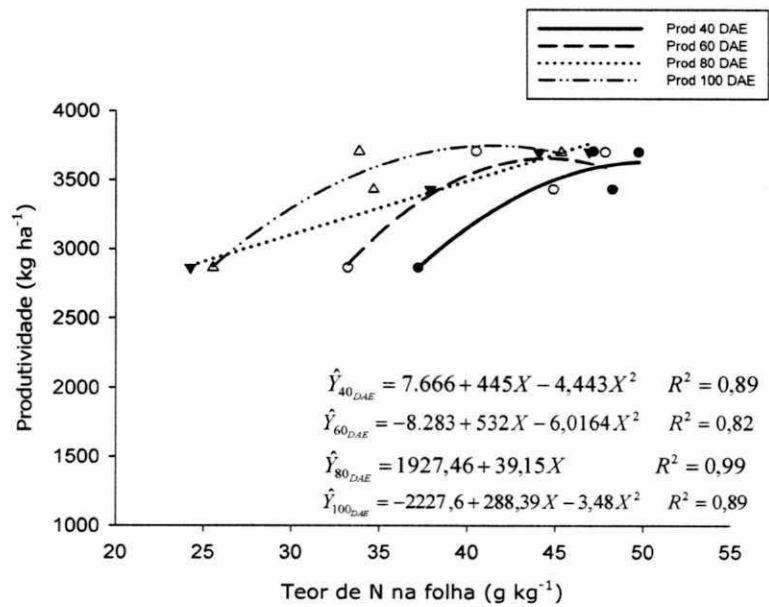


Figura 27. Teores foliares de N em função do índice SPAD, determinados em plantas de algodão aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE).

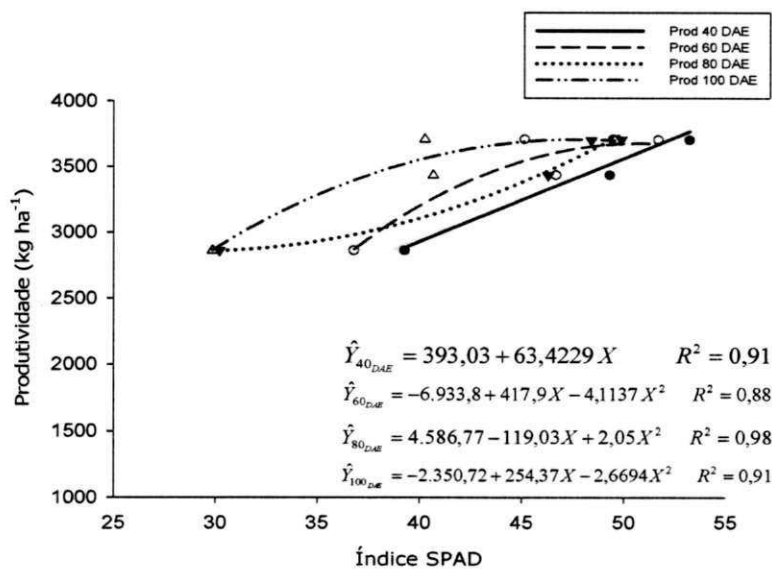
As relações entre os teores foliares de N e a produtividade seguiram o modelo polinomial quadrático na maioria das épocas de avaliação (Figura 28a). Os valores dos coeficientes de determinação obtidos para estimativa da produtividade foram de 0,89, 0,82, 0,99 e 0,89, nas amostragens aos 40, 60, 80 e 100 DAE, respectivamente.

A produtividade aumentou com a aplicação de doses crescentes de N (Figura 28c), tendo seu crescimento bem representado também através das leituras SPAD (Figura 28b). A correlação positiva e elevada entre o índice SPAD aos 40 e 60 DAE e a produtividade de algodão em caroço é importante pelo fato desses estádios compreenderem as épocas mais indicadas para a aplicação do N em cobertura.

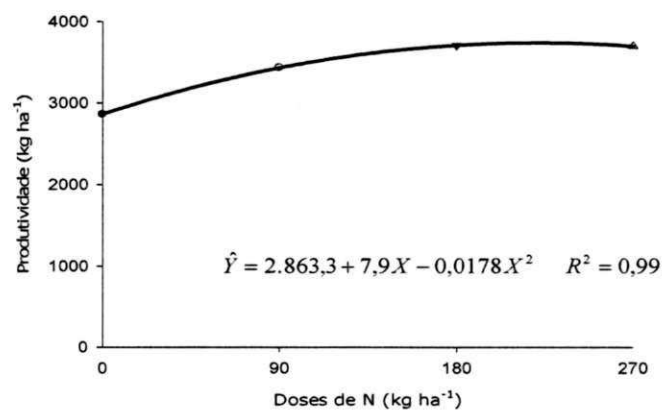
As relações entre o índice SPAD e a produtividade seguiram o modelo polinomial quadrático aos 60, 80 e 100 DAE e linear aos 40 DAE, conforme apresentado na Figura 4b. As leituras SPAD obtidas em campo apresentaram melhores coeficientes de determinação que o teor de N determinado em laboratório, sendo esses coeficientes 0,91, 0,88, 0,98 e 0,91, obtidos nas avaliações realizadas aos 40, 60, 80 e 100 DAE, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 28. Valores da produtividade do algodoeiro em resposta a: (a) teores foliares de N, obtidos nas amostragens realizadas aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE), (b) índice SPAD, obtido nas avaliações realizadas aos 40, 60, 80 e 100 (DAE), e (c) doses de N aplicadas.

do índice SPAD obtido em campo. As relações entre os teores foliares de N e o índice SPAD seguiram tendência linear para todas as épocas de amostragem, com altos coeficientes de determinação, os quais variaram de 0,95 a 0,99, conforme apresentado na Figura 27.

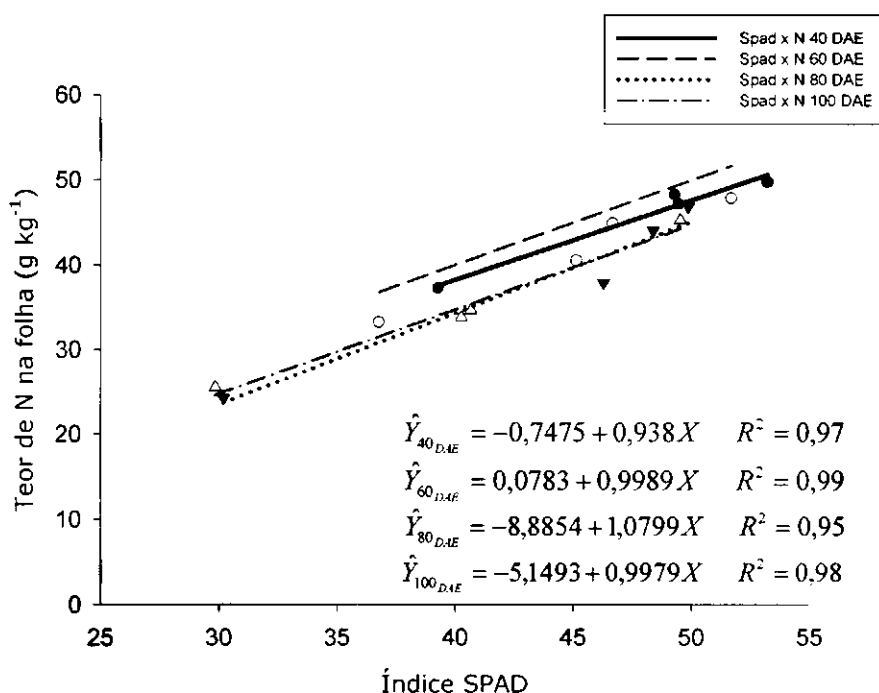
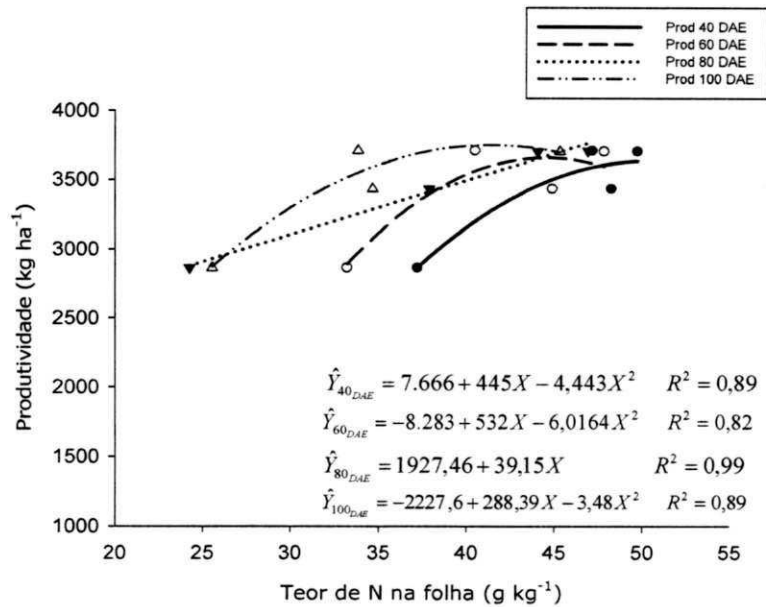


Figura 27. Teores foliares de N em função do índice SPAD, determinados em plantas de algodão aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE).

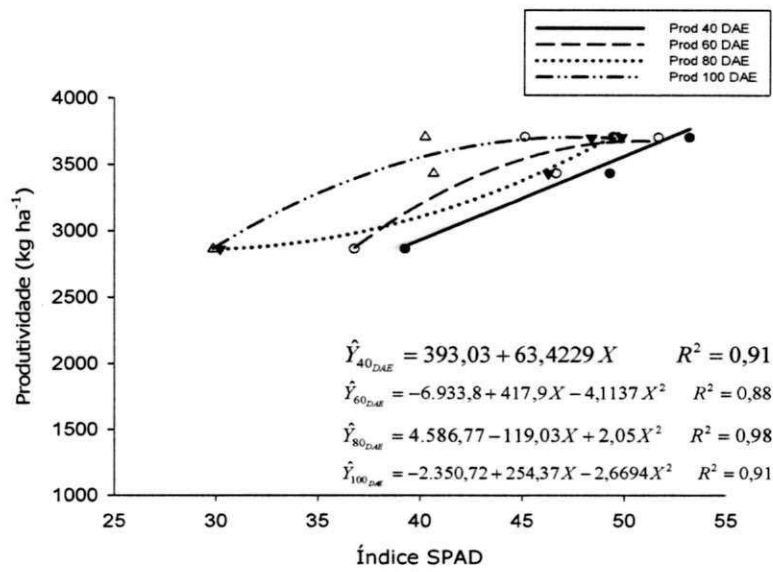
As relações entre os teores foliares de N e a produtividade seguiram o modelo polinomial quadrático na maioria das épocas de avaliação (Figura 28a). Os valores dos coeficientes de determinação obtidos para estimativa da produtividade foram de 0,89, 0,82, 0,99 e 0,89, nas amostragens aos 40, 60, 80 e 100 DAE, respectivamente.

A produtividade aumentou com a aplicação de doses crescentes de N (Figura 28c), tendo seu crescimento bem representado também através das leituras SPAD (Figura 28b). A correlação positiva e elevada entre o índice SPAD aos 40 e 60 DAE e a produtividade de algodão em caroço é importante pelo fato desses estádios compreenderem as épocas mais indicadas para a aplicação do N em cobertura.

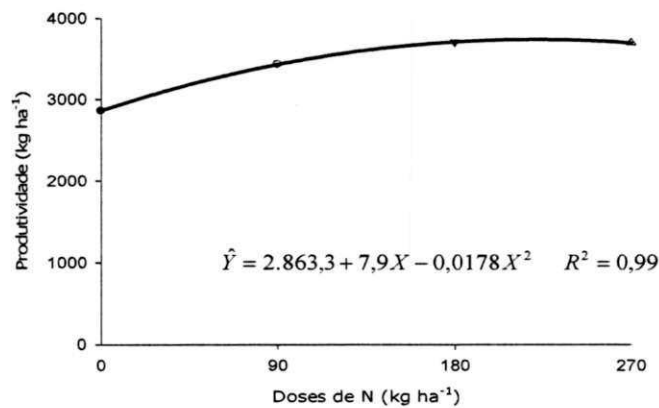
As relações entre o índice SPAD e a produtividade seguiram o modelo polinomial quadrático aos 60, 80 e 100 DAE e linear aos 40 DAE, conforme apresentado na Figura 4b. As leituras SPAD obtidas em campo apresentaram melhores coeficientes de determinação que o teor de N determinado em laboratório, sendo esses coeficientes 0,91, 0,88, 0,98 e 0,91, obtidos nas avaliações realizadas aos 40, 60, 80 e 100 DAE, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 28. Valores da produtividade do algodoeiro em resposta a: (a) teores foliares de N, obtidos nas amostragens realizadas aos 40, 60, 80 e 100 dias após a emergência (DAE), (b) índice SPAD, obtido nas avaliações realizadas aos 40, 60, 80 e 100 (DAE), e (c) doses de N aplicadas.

As equações obtidas, bem como a alta correlação das leituras SPAD com a produtividade (Tabela 9), sugerem que o índice SPAD pode ser utilizado para estimar os teores foliares de N em plantas de algodão, que é um parâmetro chave na determinação da produtividade, servindo dessa forma para correção de possíveis deficiências desse nutriente (MALAVOLTA et al., 2004). Assim, para previsão da dose necessária à obtenção da produtividade desejada pelo produtor, foram determinados os valores limites do índice SPAD e os teores foliares de N, bem como a dose corretiva de nitrogênio com essa finalidade. Na Figura 29a são apresentadas as relações entre uma simples leitura do SPAD, obtidas pelo produtor em qualquer data entre os 40 e 100 DAE, e a provável produtividade que terá a cultura se nenhuma aplicação de nitrogênio for feita naquela época. Efeito semelhante pode ser observado para os teores foliares de N (Figura 29b). É possível observar que valores obtidos abaixo do limite de 80% da máxima produtividade não são desejados. Pode-se então fazer uma classificação das produtividades desejadas a partir dessas linhas-limites obtidas na Figura 29a, traduzidas como baixa, média, alta e muito alta.

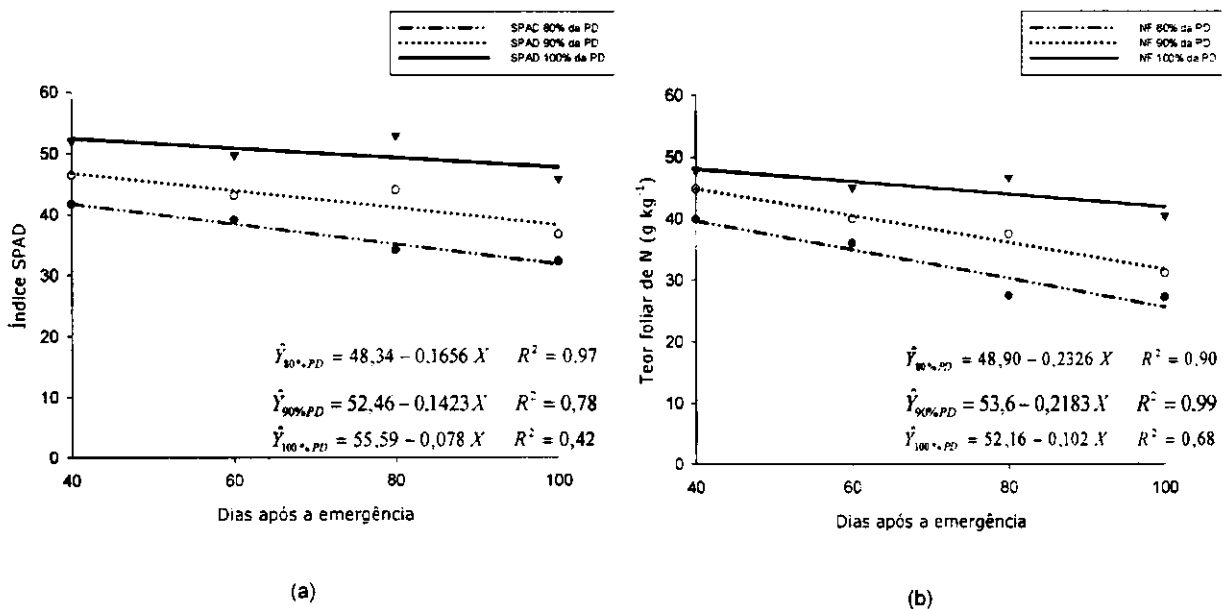


Figura 29. Valor limite do teor foliar de N e do índice SPAD para obtenção de 80, 90 e 100% da produtividade máxima(PD).

Na Tabela 10 têm-se os valores limites do Índice SPAD obtidos em campo, podendo-se correlacioná-los à dose necessária para a fertilização complementar em vários estádios fenológicos da cultura, de forma a obter a produtividade desejada. Assim, o produtor pode ser orientado a corrigir adequadamente as possíveis necessidades de nitrogênio para restaurar produtividades acima de 90% do máximo permitido pela cultura. Esses dados são úteis para correção da deficiência desse nutriente até os 70 DAE, sendo menos efetivo para correção se a deficiência for constatada entre os 71 e 90 DAE. Após os 90 DAE há pouca possibilidade de correção da deficiência com impacto positivo na produtividade. As aplicações de N podem ser

realizadas por cobertura ou através da fertirrigação. Esses valores são apenas referenciais para atestar a adequação do manejo nutricional de N na lavoura durante o ciclo no semiárido.

Tabela 10. Valores limites de índice SPAD e doses corretivas de nitrogênio necessárias para elevar a produtividade para diversos percentuais da máxima alcançada nas condições do ensaio estudado.

----- Índice SPAD -----				----- Doses corretivas de N para alcançar -----				-- Produtividade (PD) --	
30-50*	51-70*	71-90*	91-100*	100% da PD	97,5% da PD	95% da PD	90% da PD	kg ha ⁻¹	%
----- kg ha ⁻¹ -----									
39,2	35,7	32,2	28,7	225	157	127	85	2807,0	75,0
41,8	38,5	35,2	31,9	200	132	102	60	3000,0	80,1
44,2	41,1	38,0	34,9	173	105	75	33	3183,5	85,0
46,8	44,0	41,1	38,3	140	72	42	0	3372,5	90,1
49,4	46,9	44,4	41,9	98	30	0	0	3556,9	95,0
50,8	48,5	46,3	44,1	68	0	0	0	3650,2	97,5
51,7	49,7	47,7	45,7	41	0	0	0	3706,8	99,0
52,4	50,8	49,2	47,6	0	0	0	0	3743,1	100,0

* Idade fenológica da planta, considerando uma variação de ± 10 DAE, em relação as datas de medições originais de 40, 60, 80 e 100 DAE; é pouco provável que haja resposta em produtividade pela correção de deficiência além dos 90 DAE.

Técnicas de monitoramento utilizando medidas baseadas na resposta espectral da cultura, além da redução dos custos com coleta de material, permitem uma tomada rápida de decisão, minimizando os riscos de redução da produtividade que o produtor deseja obter (WEI-QUN et al., 2007). Segundo Schröder et al. (2000), devido a sua boa resposta espectral, plantas ricas em N devem ser usadas como referência para realização de diagnósticos de problemas que interfiram no verde foliar, que não sejam causados por deficiência de N, como por exemplo o ataque de pragas, doenças ou densidade populacional. Dessa forma, as possibilidades de uso do SPAD para monitorar o estado nutricional de planta do algodoeiro podem ser ampliadas.

4.1.5 Índice SPAD e sua relação com o nitrogênio foliar

As técnicas analíticas empregadas na extração de clorofila e na determinação de nitrogênio em plantas são destrutivas e fundamentam-se no uso de solventes orgânicos. Este estudo propõe a quantificação não destrutiva da concentração de pigmentos fotossintéticos e de nitrogênio em algodoeiro utilizando o medidor portátil de clorofila SPAD-502.

Na Figura 30 são apresentadas as relações entre as leituras nos clorofilômetros SPAD-502 e as concentrações de clorofila *a* (Figura 30a) e *b* (Figura 30b) nas folhas de algodão. O modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou e expressou a relação entre as leituras no clorofilômetro portátil e as concentrações de clorofila *a* e clorofila *b*. Os coeficientes de determinação para os modelos ajustados foram de 0,90 para clorofila *a* e 0,82 para clorofila *b*.

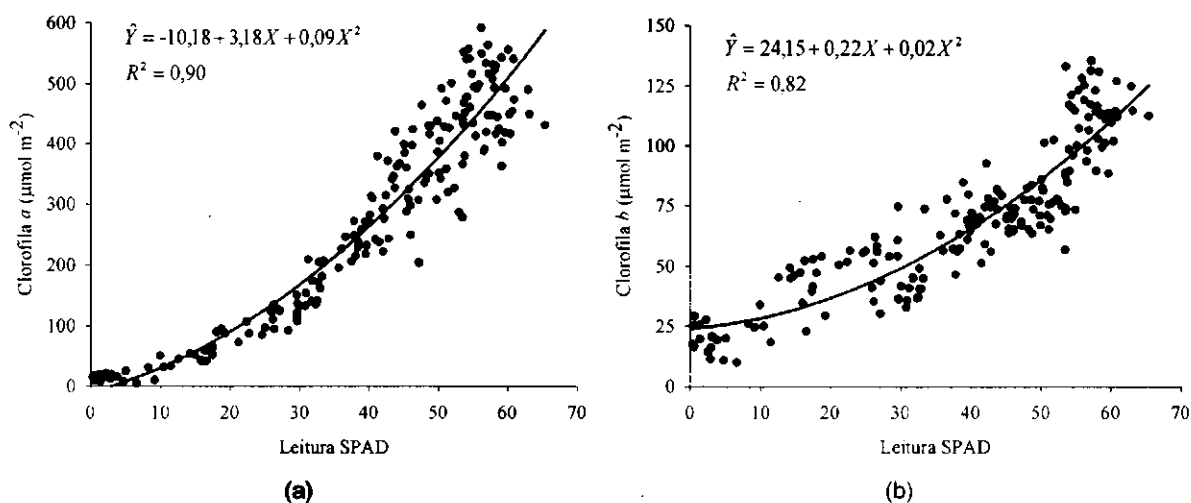


Figura 30. Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e a concentração de clorofila *a* (a) e clorofila *b* (b) em folhas do algodoeiro.

As relações entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e as concentrações de carotenóides e clorofila total estão apresentadas na Figura 31. O modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou e expressou a relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil e as concentrações de carotenóides (Figura 31a) e clorofila total (Figura 31b). Os coeficientes de determinação para os modelos ajustados foram de 0,79 e 0,81 para carotenóides e clorofila *total* (*a+b*), respectivamente.

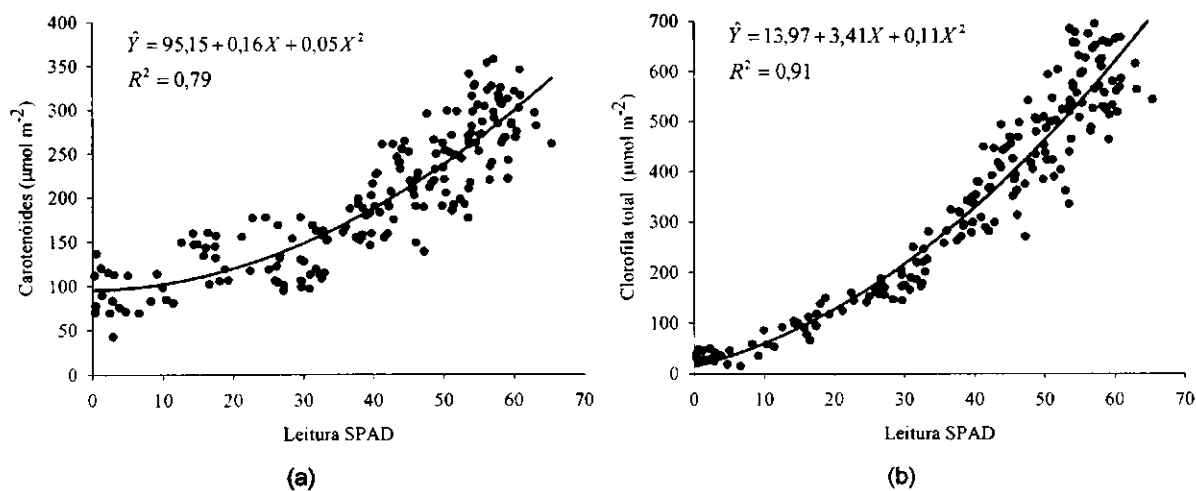


Figura 31. Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e a concentração de carotenóides (a) e clorofila *total* (b) em folhas do algodoeiro.

Para diversas espécies de plantas, as relações entre a concentração de pigmentos da fotossíntese e as leituras obtidas em clorofilômetro portátil têm sido estabelecidas, como por

exemplo, a clorofila total em *Glicyne max* e *Zea mays* (MARKWELL et al., 1995), clorofilas *a*, *b*, total, e carotenóides em *Carica papaya* L. (TORRES NETO et al., 2002) e *Coffea canephora* Pierre (TORRES NETO et al., 2005), entre outras. Em algodão a relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e os pigmentos da fotossíntese se adequaram ao modelo polinomial quadrático, sugerindo que esta espécie apresenta relação semelhante às folhas de trigo, arroz, soja (MONJE e BUGBEE, 1992) e café (TORRES NETO et al., 2005). Em algumas espécies, tanto o modelo linear como o exponencial têm se ajustado bem para expressar essas relações (TORRES NETO et al., 2002).

A Figura 32a apresenta a relação entre clorofila total/carotenóides e as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502. As leituras obtidas no clorofilômetro permitiram estimar de maneira indireta e com elevada precisão essa relação entre clorofila total e carotenóides, ajustando-se ao modelo polinomial quadrático com coeficiente de determinação de 0,91.

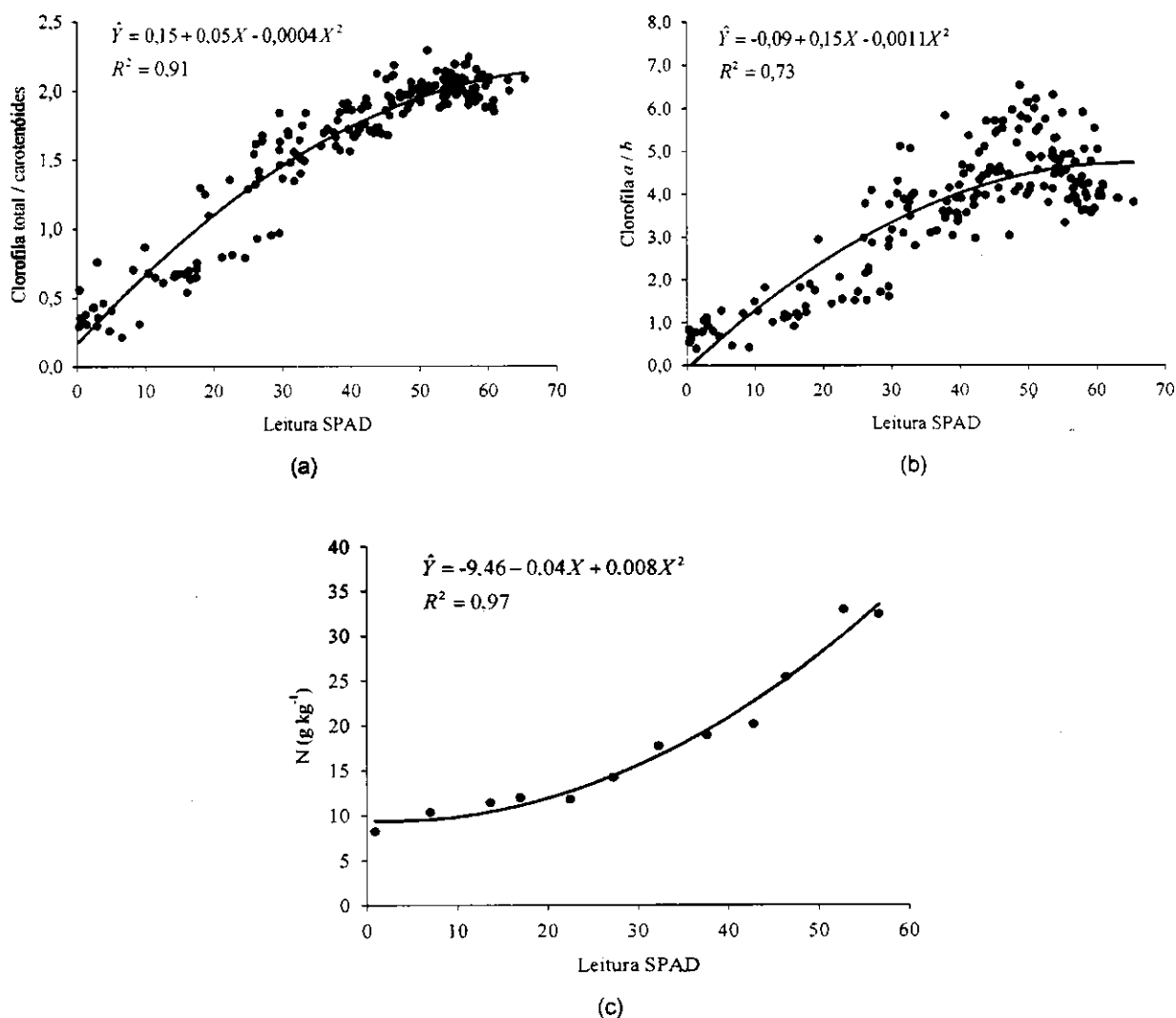


Figura 32. Leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e as relações entre: (a) Clorofila total/(a+b)/carotenóides e, (b) Clorofila a/b em folhas do algodoeiro. (c) Relação entre as leituras obtidas pelo clorofilômetro portátil SPAD-502 e os teores foliares de N em plantas de algodão.

Quando as leituras do índice SPAD apresentaram valores inferiores a 40 houve redução da relação clorofila total/carotenóides, o que também foi verificado em folhas de *Carica papaya* L. (TORRES NETO et al., 2002) e *Coffea canephora* Pierre (TORRES NETO et al., 2005), que pode ser decorrente do processo de senescência das folhas, já que a medição foi realizada aos 100 DAE para folhas de diversas idades fisiológicas a fim de obter-se uma relação independente da idade ou do estado nutricional da planta, pois também fatores como deficiências nutricionais, especialmente relacionadas a quantidade de nitrogênio, podem provocar o mesmo efeito (BOGGS et al., 2003; BUCKLAND et al., 1991).

De uma maneira geral demonstra-se que a proporção entre clorofila *a* e *b* tende a diminuir com a redução da intensidade luminosa. (LEE, 1988). Uma maior proporção relativa de clorofila *b* em plantas sombreadas é uma característica importante, pois possibilita a captação de energia de outros comprimentos de onda e transferência para uma molécula específica de clorofila *a*, que efetivamente toma parte das reações fotoquímicas da fotossíntese (MARKWELL et al., 1995)..

Semelhantemente às demais características avaliadas, a relação entre clorofilas *a/b* e o índice SPAD seguiram o modelo quadrático com R^2 de 0,73 (Figura 32b). Da mesma maneira que ocorreu com a relação entre clorofila total/carotenóides, a relação entre clorofila *a/b* apresentou redução nas leituras do SPAD-502 com valores abaixo de 40. Provavelmente, essa redução ocorreu devido à clorofila *a* se degradar mais intensamente do que a clorofila *b* (WOLF, 1956).

Na Figura 32c é apresentada a relação entre índice SPAD e o conteúdo de nitrogênio, onde se observou decréscimo no conteúdo de nitrogênio total quando o índice SPAD apresentou valores inferiores a 40.

Com os resultados deste trabalho, foi possível a obtenção de modelos matemáticos que associados às leituras obtidas com o clorofilômetro portátil SPAD-502 possibilitam a predição da concentração dos pigmentos da fotossíntese e dos teores foliares de N em plantas de algodão herbáceo de maneira simples e com elevado grau de precisão, economia de recursos, espaço físico e tempo, no processamento de amostras comumente demandados nestas análises.

Tabela 13. Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação** obtidos por espectrorradiometria com o IAF e a fitomassa do algodoeiro obtidos em campo em resposta a adubação nitrogenada avaliados aos 100 DAE.

Correlação-Época	Fitomassa	IAF	NDVI	RDVI	SAVI	TVI	MSAVI	MTVI2
Fitomassa	1	0,98	0,87	0,82	0,87	0,86	0,83	0,82
IAF	0,98	1	0,89	0,86	0,89	0,89	0,85	0,84

(*) Todos os IVS foram significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t

Apesar de ainda bastante altas, as correlações entre os IVs e o IAF, se comparadas à medição anterior, apresentaram-se levemente reduzidas quando comparadas àquelas obtidas aos 100 DAE variando de 0,84 a 0,89, com o NDVI e SAVI apresentado os melhores resultados. Essa resposta pode ser explicada pelo fato de que aos 100 DAE, plantas fertilizadas com as menores doses de N já se encontravam com mais que dois capulhos abertos e com redução da área foliar, enquanto aquelas tratadas com doses maiores de N ainda se encontravam abrindo os primeiros capulhos e com máxima cobertura vegetada. Com relação à fitomassa do algodoeiro observada aos 100 DAE, as correlações entre os IVs e o IAF variaram de 0,82 a 0,87, com o NDVI e o SAVI apresentando os melhores resultados. Esse resultado é esperado com o aumento da cobertura vegetada, pois o coeficiente de ajuste do solo obtido por Huete (1988) vai diminuindo, ou seja, o SAVI vai tendendo ao NDVI, como visto anteriormente na Equação 4.

Os estudos com avaliações da fitomassa e sua correlação com os teores de nutrientes no tecido foliar da planta ainda são poucos. Alguns estudos utilizando espectrorradiômetro portátil obtiveram boas correlações entre as doses de N aplicadas e o IAF (MOTOMIYA et al., 2009, ZHAO et al., 2007), ou das doses com a fitomassa (ZHAO et al., 2007, REDDY et al., 2004). Li et al. (2001) observaram que o NDVI obtido através de espectrorradiômetro portátil, extraídas a dois metros acima da cultura, estava bem correlacionado as doses de N, a fitomassa e a produtividade do algodoeiro. Nesse estudo, onde o NDVI máximo no estágio de pleno florescimento foi de 0,69, eles obtiveram correlações superiores a 80% para a fitomassa que cresceu até o máximo florescimento, decaindo com o início da senescência. Isso mostrou o potencial do monitoramento da cultura durante seu ciclo como forma de prever a necessidade de suplementação da fertilização.

4.2.2 Avaliação das relações entre os IVs e as doses de P_2O_5 aplicadas em função das épocas

O fósforo é essencial ao metabolismo das plantas, pois desempenha um importante papel na transferência de energia, na respiração e na fotossíntese. Esse nutriente também é um componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. Limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo que sejam feitas suplementações da adubação fosfatada, elevando-a a níveis adequados (GRANT et al., 2001).

Embora as plantas não apresentem sintomas visuais de deficiência quando o suprimento desse nutriente é moderado, sob deficiência mais severa geralmente as folhas adquirem coloração que varia de verde muito escuro até púrpura. A deficiência de P também pode reduzir a síntese de ácido nucleico e de proteína, induzindo a acumulação de compostos nitrogenados solúveis (N) no tecido, retardando assim o crescimento celular, ou, em casos mais graves, paralisando o desenvolvimento da célula. Como consequência, os sintomas de deficiência desse nutriente provocam redução na altura da planta, atraso na emissão do fluxo vegetativo e redução na brotação e desenvolvimento de raízes secundárias, afetando diretamente a produtividade com uma menor produção de massa seca e de sementes.

Muitos trabalhos com sensoriamento remoto concentram-se no estudo das deficiências nutricionais com a adubação nitrogenada, devido à alta correlação dos teores foliares de N tanto com as doses aplicadas quanto com a clorofila. Entretanto, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para detecção de deficiência nutricional com fósforo usando a refletância espectral. Milton et al. (1991), trabalhando com soja em solução nutritiva e usando três concentrações de P, avaliaram semanalmente as alterações observadas nas folhas através de medições da refletância espectral. Eles constataram que plantas com deficiência em P apresentavam maior refletância nas regiões do verde e amarelo. Por outro lado, Osborne et al. (2002), trabalhando com milho, avaliaram as melhores refletâncias espectrais para indicar os teores de N e P com dados hiperespectrais na determinação da produtividade, verificando faixas espectrais bem correlacionadas e altamente significantes ($p < 0,001$) com a fitomassa e a produtividade dessa cultura.

Na Figura 34 são apresentadas as relações entre as doses de P_2O_5 aplicadas e os IVs obtidos através de espectrorradiometria de campo no algodoeiro ao longo das épocas de amostragem. Os índices de vegetação seguiram o modelo polinomial quadrático em resposta a aplicação de P_2O_5 . Nas duas primeiras épocas de avaliação os IVs aumentaram com o aumento da adubação fosfatada, enquanto aos 100 DAE a curva de crescimento foi reduzida.

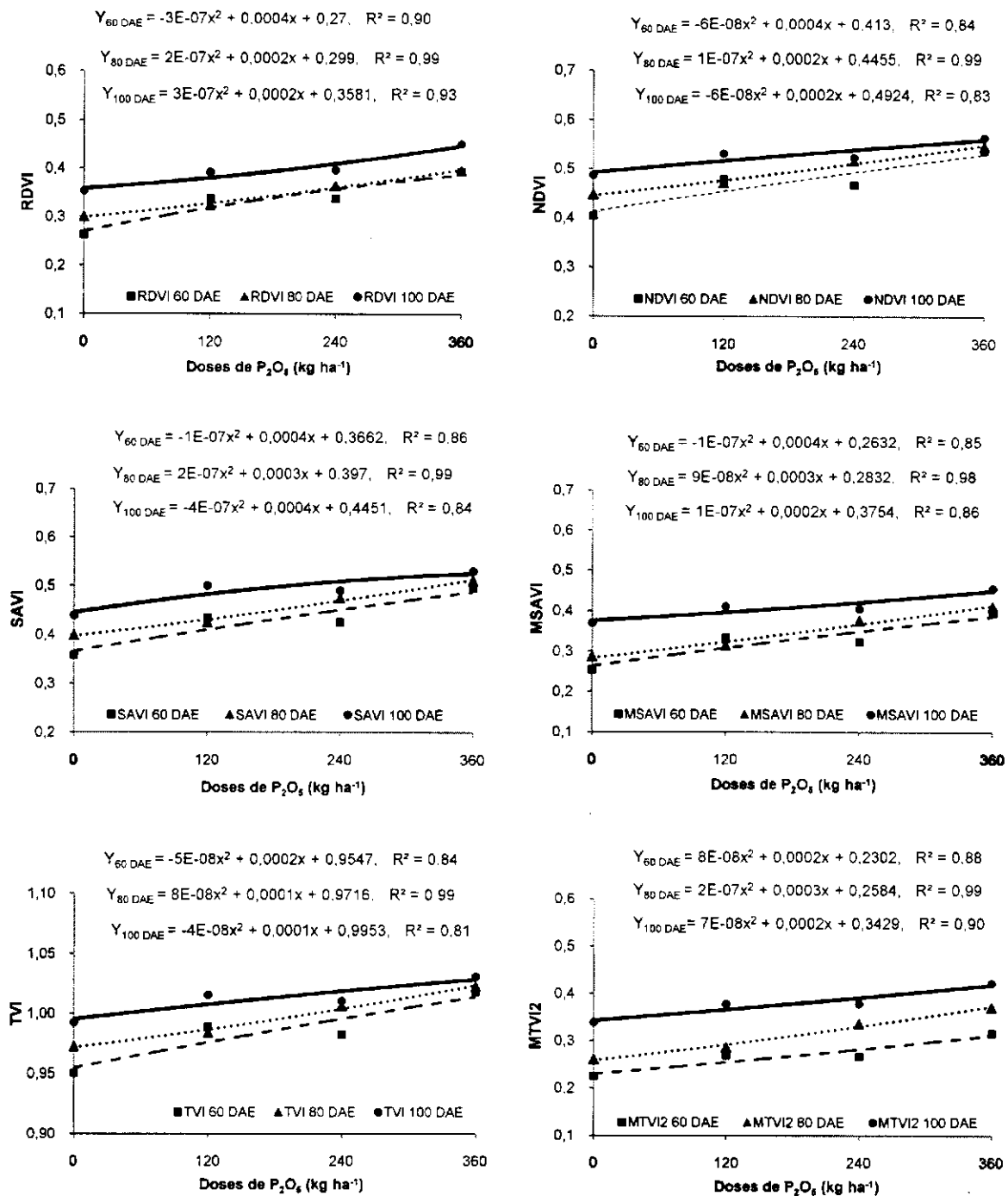


Figura 34. Relações entre as doses de P_2O_5 aplicadas e os IVs obtidos através de espectrorradiometria de campo em plantas de algodão ao longo das épocas de amostragem.

Aos 60 DAE, o índice que apresentou o melhor ajuste com os dados foi o RDVI com coeficiente de determinação de 0,90. Esse índice variou de 0,26 a 0,39, com amplitude semelhante ao NDVI, SAVI e MSAVI, que na mesma época variaram de 0,40 a 0,54, 0,36 a 0,50 e 0,25 a 0,40, respectivamente. Os índices de vegetação cresceram com o incremento das doses de P_2O_5 , se ajustando ao modelo polinomial quadrático aos 80 DAE. Nessa época observaram-se os maiores coeficientes de determinação, que foram de 0,98 para o MSAVI e 0,99 para os demais.

Aos 100 DAE, houve uma tendência de redução na amplitude dos valores obtidos pela espectrorradiometria, embora os valores de R^2 continuassem altos. O índice com maior coeficiente de determinação para essa época de avaliação foi o RDVI, cujo R^2 foi de 0,93 apresentando o melhor ajuste em todas as épocas avaliadas.

De maneira geral, para o tratamento sem adubação fosfatada, observou-se que todos os IVs aumentaram com o crescimento da planta. Esse efeito pode ser explicado, considerando-se que, a tendência da planta é crescer de forma sigmoidal e, apesar da não aplicação de P_2O_5 , havia outros nutrientes em suficiência para o crescimento das plantas. Conseqüentemente, elas continuaram a aumentar sua área foliar devido a dose de suficiência de nitrogênio, disponibilidade de água e de outros macro e micro nutrientes presentes. Assim a resposta espectral do algodoeiro acompanhou o crescimento vegetativo das plantas, tendo esse efeito também sido observado por Mozaffari et al. (2005) ao estudarem a resposta na refletância do algodoeiro irrigado para doses crescentes de P.

Ainda seria preciso estudar quais os comprimentos de onda que melhor se correlacionam com a resposta espectral da cobertura vegetada em resposta a fertilização fosfatada. Milton et al. (1991), estudando as faixas de refletância para a adubação fosfatada, constataram que plantas deficientes em P apresentavam maior refletância nas regiões do verde e amarelo, enquanto que Osborne et al. (2002) observaram refletâncias significantes ($P < 0,05$) em 440 nm para doses de P_2O_5 acima de 67 kg ha^{-1} , constatando ainda que plantas sem adubação fosfatada apresentavam alta refletância a partir de 445 nm até 460 nm. De acordo com Marschner (1995), a deficiência de P aumenta a produção de antocianina, causando a coloração púrpura nas folhas das plantas. De forma similar, Salisbury e Ross (1978) constataram que a antocianina apresenta forte absorção na região verde e reflete no azul do espectro eletromagnético.

4.3. Equações preditivas do IAF e Fitomassa do Algodoeiro com dados de espectrorradiometria de campo

A capacidade dos índices de vegetação para diagnosticar o status de nutrientes através da refletância da vegetação, está ligado aos comprimentos de onda adequados a essa resposta. Para determinação dos IVs aqui obtidos, foram usados os comprimentos de onda de 670 nm (vermelho) e 800 nm (infravermelho próximo), que melhor se correlacionam com a resposta a adubação nitrogenada e conseqüentemente ao IAF e produção de fitomassa da cultura em estudo (ZHAO et al., 2005; HABOUDANE et al., 2004; SERRANO et al., 2000).

Estudos correlacionando o IAF e a produção de fitomassa com a adubação fosfatada e seus efeitos na refletância ainda são incipientes. Entretanto, esses estudos são úteis para mostrar o potencial de resposta espectral da cultura em relação à adubação fosfatada. Osborne et al. (2002), estudando o efeito da adubação fosfatada sobre a cultura do milho, constataram resposta significativa na fitomassa em função da aplicação de P_2O_5 , nos primeiros estádios fenológicos da planta e com redução da significância em estádios mais avançados.

Muitos estudos já demonstraram que os índices de vegetação obtidos a partir de comprimentos de onda no vermelho e no infravermelho próximo estão bem correlacionados com variáveis biofísicas da cultura, como o IAF e a fitomassa acima do solo, bem como ao conteúdo de clorofila e status do nitrogênio nas plantas (ZHAO et al., 2005; SERRANO et al., 2000). De forma geral, os IVs obtidos em campo através de espectrorradiometria têm se desempenhado melhor na estimativa dessas variáveis agrônômicas devido à redução dos efeitos de atenuação e distorção dos sinais pela proximidade do alvo a ser estudado (ZHAO et al., 2007; BROGE e LEBLANC, 2001). Assim, um dos objetivos desse estudo foi avaliar o comportamento dos IVs escolhidos na estimativa do IAF e da produção de fitomassa do algodoeiro irrigado.

Após a obtenção dos índices de vegetação, NDVI, RDVI, SAVI, TVI, MSAVI e MTVI2, observou-se que os mesmos cresceram com o incremento da adubação nitrogenada e com a elevação do índice de área foliar (IAF), apresentando comportamento exponencial, seguindo o modelo de Beer, com elevados coeficientes de determinação conforme apresentado na Figura 35 para o NDVI, RDVI, SAVI, MSAVI e MTVI2, e na Figura 36 para o TVI, separado devido a peculiaridade de sua escala. Em todas as equações preditivas o NDVI é apresentado em cada gráfico para melhor comparação com os demais índices.

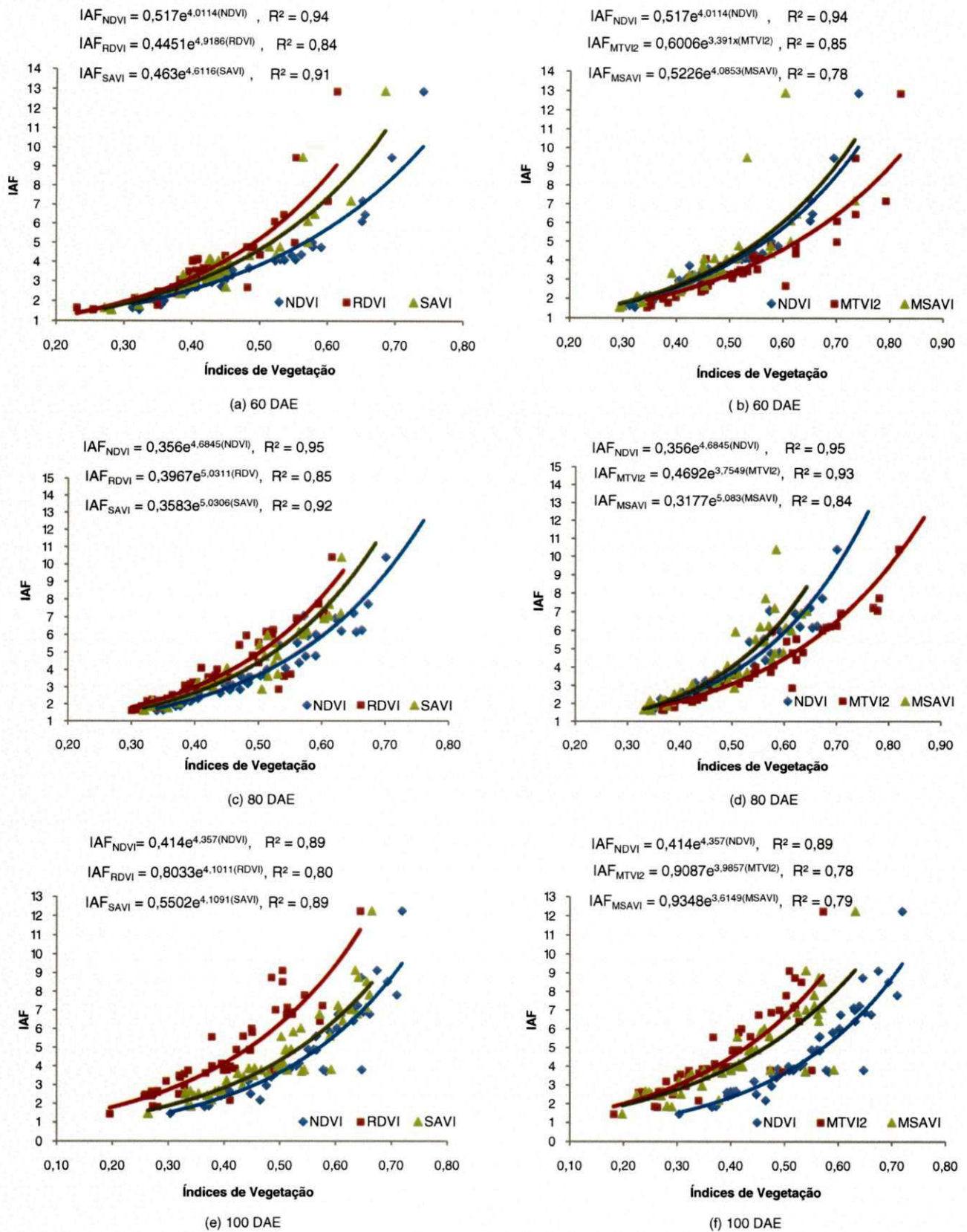


Figura 35. Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) em plantas de algodão sob regime de irrigação como função dos índices de vegetação, obtidos nas diferentes épocas de amostragem usando dados do espectrorradiômetro. (a) e (b) 60 DAE; (c) e (d) 80 DAE; (e) e (f) 100 DAE.

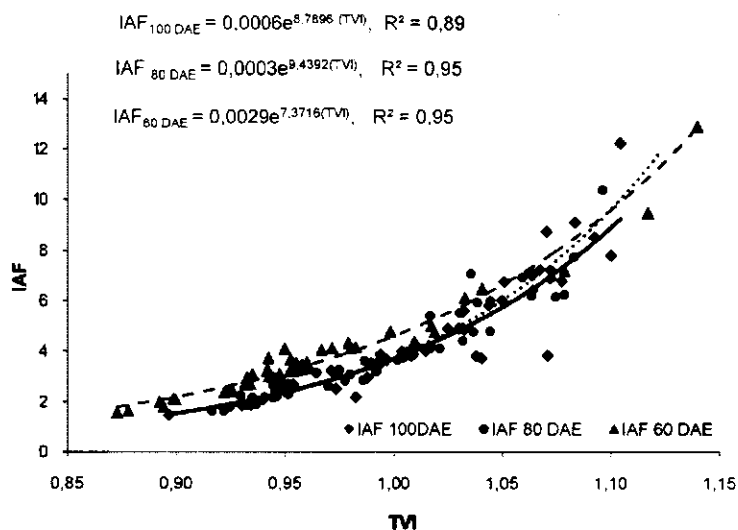


Figura 36. Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) em plantas de algodão sob regime de irrigação como função do índice de vegetação transformado (TVI), obtido nas diferentes épocas de amostragem usando dados do espectrorradiômetro.

Todos os IVs apresentaram altas correlações com o IAF, que variaram de 0,75 a 0,95, 0,77 a 0,91 e 0,85 a 0,90 aos 60, 80 e 100 DAE, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 14. Aos 60 DAE, o TVI, que é um índice proposto para aumentar a sensibilidade à fitomassa, apresentou o melhor coeficiente de determinação, $R^2=0,95$, seguido pelo NDVI com $R^2=0,94$. Esses índices apresentaram as melhores correlações com o IAF nessa data, que foram de 0,90 para o NDVI e 0,95 para o TVI. Pode-se observar na Figura 36, que o TVI não mostrou efeito de saturação até IAFs elevados como 8 a 9, mesmo com a pequena amplitude da escala desse índice, indicando ser o melhor preditor do IAF nessa data. É importante observar que nessa fase o algodão estava com IAF variando desde 1,65 para o tratamento sem adubação até 12,91 para o tratamento com as maiores doses de N e P_2O_5 . Por outro lado, aos 80 DAE o TVI, apresentou o mesmo coeficiente de determinação que o NDVI, $R^2=0,95$, embora tenha sido observada uma correlação um pouco menor com o IAF, cujo valor foi de 0,90 e 91, para o TVI e NDVI, respectivamente, confirmando o potencial do NDVI como um bom estimador das condições gerais da cultura e da produção de fitomassa da mesma, onde o alto valor do mesmo indica o vigor e densidade da cobertura vegetal.

Um efeito que deve ser observado é o fato de que o MTVI2, que é um índice menos sensível a variações do conteúdo da clorofila e com ajuste ao efeito do solo, assumiu um dos maiores valores no estágio de pleno florescimento do algodoeiro, acompanhado o NDVI com correlação de 0,91. Isso pode ser observado na Figuras 35d, na avaliação realizada aos 80 DAE, onde o NDVI está plotado como referencial. O MTVI2 variou de 0,35 a 0,82 aos 60 DAE, contra uma variação de 0,31 a 0,74 do NDVI para a mesma época. Esse índice continuou a crescer com o desenvolvimento da cultura, sendo observada grande amplitude nos valores, os quais variaram de 0,38 a 0,87 aos 80 DAE contra 0,37 a 0,76 para o NDVI. Embora a correlação desses índices com o IAF tenha sido a mesma, com valor de 0,91 ($P<0,01$), os coeficientes de determinação do MTVI2 foram de 0,85 e 0,93 enquanto que para o NDVI foram de 0,94 e 0,95, observados aos 60 e 80 DAE, respectivamente.

Tabela 14. Valores da correlação entre os índices de vegetação** obtidos por espectrorradiometria e o IAF obtido em condições de campo em plantas de algodão.

Época	NDVI	RDVI	SAVI	TVI	MSAVI	MTVI2
60 DAE	0,90	0,84	0,88	0,95	0,75	0,87
80 DAE	0,91	0,84	0,89	0,90	0,77	0,91
100 DAE	0,90	0,87	0,89	0,89	0,85	0,85

(**) Todos os IVS foram significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t

No estágio de pleno florescimento, que ocorreu aos 80 DAE, a cobertura foliar era intensa e as plantas encontravam-se com pelo menos 60% das maçãs cheias, apresentando-se como o período de maior NDVI. Nessa época de avaliação, o IAF apresentou variação desde 1,86 para tratamentos sem adubação, até 15,45, para os tratamentos que receberam as maiores doses de N e P₂O₅. O NDVI ainda continuava crescendo com o aumento da área foliar, apresentando tendência a redução para valores de IAF bem mais elevados que os citados na literatura, variando de 7 a 8 no estágio de pleno florescimento. Diferentemente, Moreira (2001), estudando a soja, observou o comportamento assintótico desse IV para valores de IAF acima de 4, enquanto Haboudane et al. (2004), estudando o potencial dos IVs para prever o IAF em três culturas diferentes (milho, soja e trigo), encontraram que o NDVI saturava para IAFs superiores a 3. Apesar dos baixos valores do IAF para saturação do NDVI obtidos nessas pesquisas, deve-se considerar que os resultados obtidos pelos autores supracitados foram correspondentes a valores do NDVI superiores a 0,8 e 0,9, para o primeiro e segundo autores, respectivamente, enquanto na presente pesquisa os valores observados para o NDVI não ultrapassou 0,76, indicando ainda tendência de crescimento antes de atingir a saturação. O comportamento assintótico do NDVI para altos IAFs também foi constatado por Runyon et al. (1994), num estudo das relações entre IAF e o NDVI, os quais constataram que a saturação ocorreu para valores de NDVI acima de 0,75. Uma das razões para a obtenção desse resultado pode ser explicado pelo fato de que o NDVI além de estar bem correlacionado às características estruturais da planta também responde a fortemente a parâmetros associados à radiação fotossinteticamente ativa absorvida, como foi observado por Huete et al. (1997). Num estudo do comportamento dos IVs para vários tipos de cobertura vegetada, esses autores observaram que a saturação do NDVI variava de acordo com o tipo de cobertura vegetada, a resposta do solo e a radiação incidente. Eles observaram que o NDVI respondeu melhor a refletâncias no vermelho e a parâmetros associados com a radiação fotossinteticamente absorvida, enquanto outros índices como o SAVI responderam no IVP, estando melhor correlacionado com características estruturais da planta como por exemplo o IAF. Eles encontraram também o efeito de saturação do NDVI com relação a áreas de grande fitomassa acumulada, constatando valores constantes desse índice acima de 0,8.

Neste estudo pode-se observar que, nos estádios fenológicos iniciais, o MTVI2 não sofreu o efeito de saturação até IAFs de 7 a 8. Esse efeito também foi observado por Haboudane et al. (2004) onde o MTVI2 atingiu valores tão altos como 0,95, e só a partir daí iniciou a tendência assintótica, para valores de IAF superiores a 7.

Considerando os outros índices de vegetação, embora não tenham sido observados os

melhores coeficientes de determinação para o SAVI nas avaliações realizadas aos 60 e 80 DAE, este índice se ajustou bem ao aumento do IAF, onde foram constatados valores de $R^2 = 0,91$ e $0,92$, para correlações $0,88$ e $0,89$, respectivamente. Já o RDVI e MSAVI apresentaram os menores coeficientes de determinação nas duas primeiras épocas de avaliação, tendo esse último o pior desempenho. Aos 60 DAE foi observado $R^2 = 0,84$ e $R^2 = 0,78$, para o RDVI e MSAVI, respectivamente, tendo o primeiro aumentado seu coeficiente de determinação para $0,85$ e o segundo elevado para $0,84$, na avaliação feita aos 80 DAE. O RDVI mostrou-se muito similar ao SAVI, como pode ser visto nas Figuras 35a e 35c, aos 60 e 80 DAE, apresentando uma amplitude menor nos valores observados com tendência a saturação em valores de IAF acima de 6 aos 60 DAE e 5 aos 80 DAE. Por outro lado, o MSAVI apresentou comportamento assintótico para valores muito baixos de IAF (>4), como pode ser visto nas Figuras 35b e 35d, nas duas primeiras datas de avaliação. Em um estudo de Broge e Leblanc (2001), onde foram usados modelos de transferência radiativa, o MSAVI apresentou-se como o melhor índice para estimativa do IAF com relação à sensibilidade aos efeitos do dossel, enquanto que noutros estudos ele apresentou-se também como o melhor preditor para o índice de área foliar em cobertura vegetal densa (ZHAO et al., 2005; BROGE e LEBLANC, 2001). Entretanto, esses efeitos não foram observados neste estudo, indicando que talvez seja necessário aprofundamento do estudo para ajuste desse índice e avaliação do fator de ajuste do solo (L) proposto, com relação as propriedades ópticas dos solos no local do experimento.

Na última data de avaliação, o algodoeiro já apresentava redução na sua área foliar e em média, dois capulhos abertos por planta, onde as plantas com maiores deficiências nutricionais iniciaram mais cedo a senescência e nos tratamentos com plantas bem nutridas os primeiros capulhos estavam abrindo. Nesse período, onde o IAF variou desde $1,46$ para o tratamento sem adubação nitrogenada e fosfatada, até $12,25$, para tratamentos que receberam as maiores doses desses fertilizantes, os índices de vegetação acompanharam o decréscimo do IAF, como pode ser observado nas Figuras 36, 35e e 35f.

Os coeficientes de correlação obtidos entre os IVs e o IAF, que variaram de $0,85$ a $0,90$, estão na Tabela 14, e mostram que o IV melhor correlacionado a esta variável biofísica foi o NDVI, e os menos correlacionados foram o MSAVI e o MTVI2, aos 100 DAE. O SAVI e o TVI apresentaram correlações muito próximas ao NDVI, onde foi observado que estes três índices se ajustaram melhor para estimativa do IAF aos 100 DAE, todos com o mesmo coeficiente de determinação, cujo valor foi $0,89$. O NDVI e o SAVI apresentaram curvas muito semelhantes, com diferenciação apenas na amplitude dos valores, que variaram de $0,30$ a $0,72$ e $0,26$ a $0,66$, para o NDVI e SAVI, respectivamente. Já o TVI variou de $0,90$ a $1,10$ e apresentou tendência de saturação com IAFs superiores a 9.

O RDVI aos 100 DAE variou de $0,20$ a $0,64$, com correlação $0,87$, e $R^2=0,80$, enquanto que o MTVI2 e o MSAVI apresentaram coeficientes de determinação $0,78$ e $0,79$, respectivamente. De acordo com Zarco-Tejada et al. (2005), índices espectrais relacionados a variáveis biofísicas do algodoeiro, como o NDVI, o RDVI e o TVI são muito úteis na estimativa do IAF quando usados em estágios menos avançados do desenvolvimento dessa cultura. Eles

indicam o início da floração (formação dos primeiros botões florais) e o pleno florescimento, como as épocas mais adequadas para esse fim. Neste estudo foi comprovado que as melhores datas para estimativa adequada do IAF foram aos 60 e 80 DAE, confirmando os resultados de Zarco-Tejada et al. (2005), embora também tenha sido observado que esses índices puderam estimar adequadamente o IAF aos 100 DAE, apenas mostrando menor precisão que as duas épocas de avaliação anteriores. Esse resultado pode ter sido obtido devido a heterogeneidade da cultura nesse estágio, onde plantas com nutrição deficiente já haviam iniciado a senescência com o amarelecimento de folhas e abertura de alguns capulhos, enquanto nos tratamentos onde as plantas estavam bem nutridas ainda havia crescimento vegetativo, com uma grande cobertura foliar e sem efeito de amarelecimento das folhas. Essa resposta dos IVs foi avaliada anteriormente tanto para a adubação nitrogenada, apresentada na Figura 33, bem como para a adubação fosfatada, vista na Figura 34.

Uma boa forma de avaliar os índices de vegetação na predição das características biofísicas e correlacioná-los à produtividade é através da estimativa da fitomassa da cultura. A estreita relação entre o IAF, com os IVs e a produção de fitomassa levou ao estudo das relações entre a fitomassa do algodoeiro e esses IVs, de forma a entender a capacidade preditiva dos mesmos, como meio de reduzir o trabalho e os custos de avaliação da fitomassa por métodos tradicionais.

As equações preditivas para a produção de fitomassa no algodoeiro irrigado foram obtidas como função dos índices de vegetação observados por espectrorradiometria de campo. Os IVs acompanharam o aumento da fitomassa ao longo do desenvolvimento da cultura, onde todas as relações se ajustaram ao modelo exponencial, conforme pode ser observado na Figura 38, para o NDVI, RDVI, SAVI, MSAVI e MTVI2, e na Figura 37 para o TVI, separado mais uma vez por sua escala diferenciada.

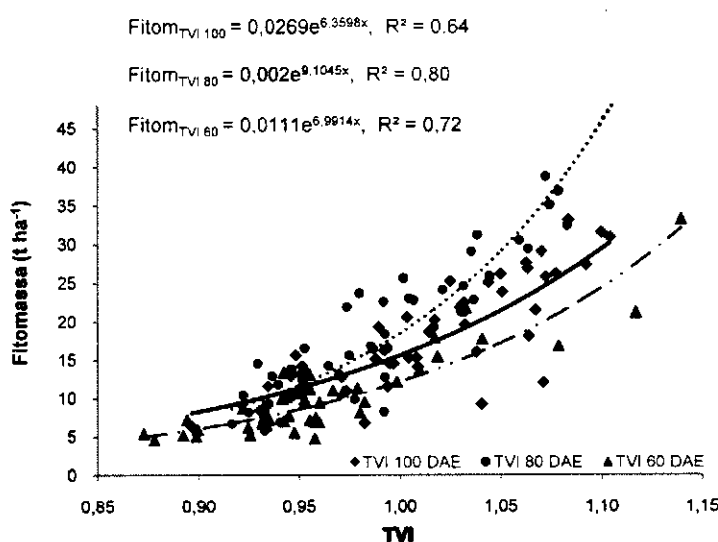
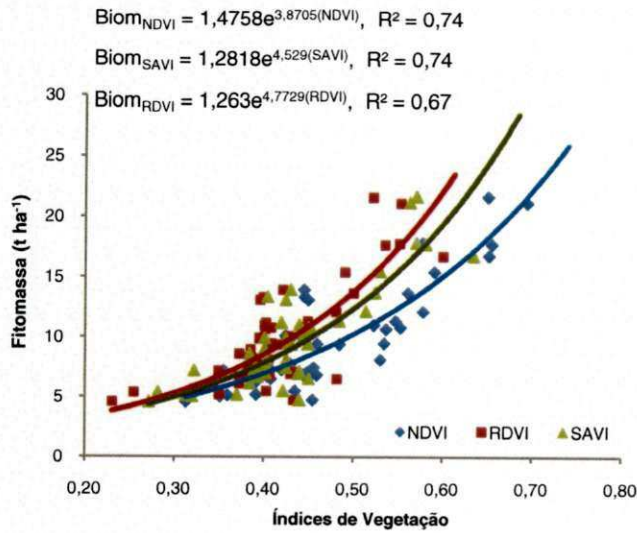
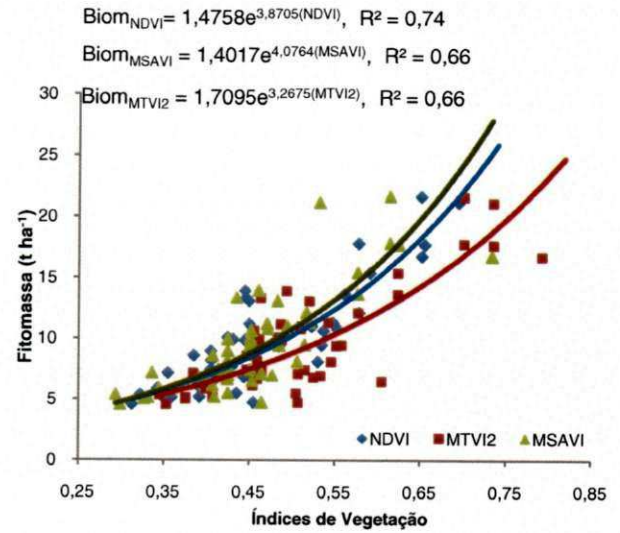


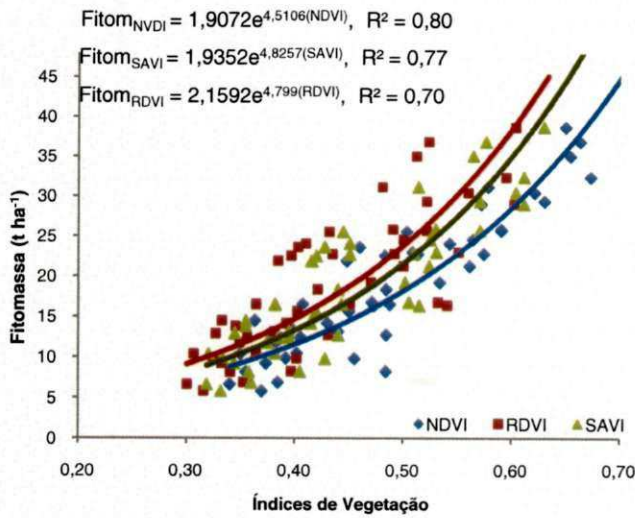
Figura 37. Equações preditivas para a fitomassa do algodoeiro como função do índice de vegetação transformado (TVI), obtido com espectrorradiometria de campo nos três estágios fenológicos estudados, 60, 80 e 100 DAE.



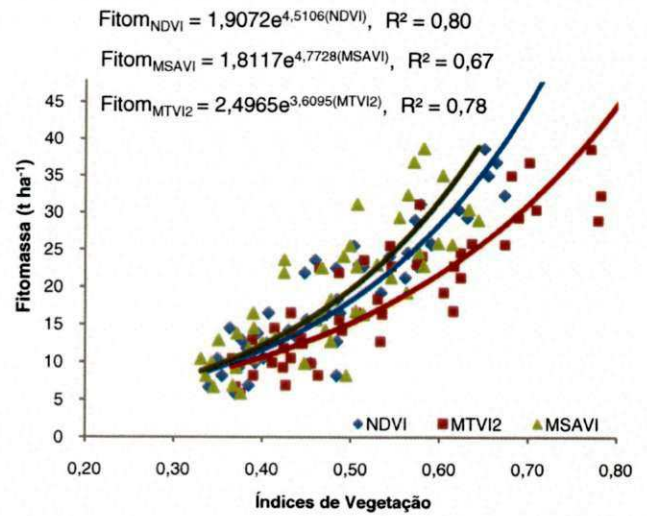
(a) 60 DAE



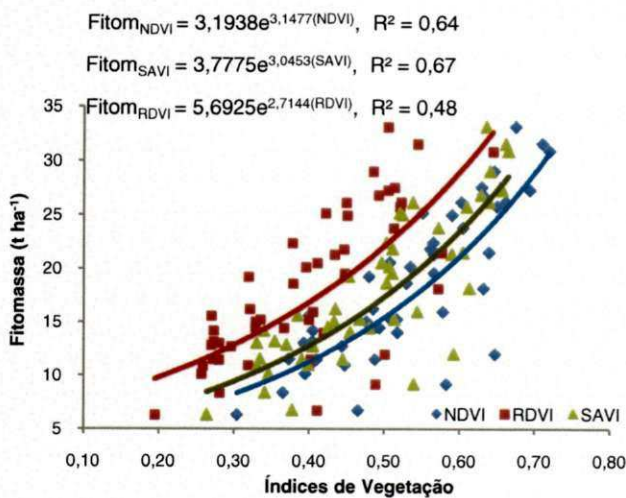
(b) 60 DAE



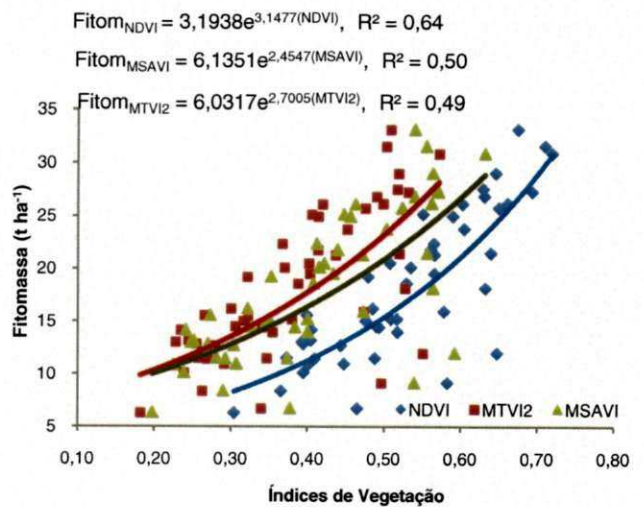
(c) 80 DAE



(d) 80 DAE



(e) 100 DAE



(f) 100 DAE

Figura 38. Equações preditivas da fitomassa do algodoeiro como função dos índices de vegetação obtidos com espectrorradiômetro, nos três estádios fenológicos estudados (60, 80 e 100 DAE).

Os coeficientes de correlação de Pearson para as três épocas de amostragem são apresentados na Tabela 15. A resposta espectral do algodoeiro sofreu alterações nas diferentes épocas de avaliação, determinando quais os IVs que melhor se ajustaram estimativa da fitomassa para cada estágio fenológico.

Tabela 15. Valores da correlação entre os índices de vegetação** obtidos por espectrorradiometria e a fitomassa obtida em condições de campo em plantas de algodão.

Época	NDVI	RDVI	SAVI	TVI	MSAVI	MTVI2
60 DAE	0,85	0,81	0,86	0,88	0,75	0,83
80 DAE	0,92	0,84	0,88	0,91	0,77	0,91
100 DAE	0,82	0,73	0,83	0,82	0,74	0,73

(**) Todos os IVs foram significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t

Com o algodoeiro no início da floração aos 60 DAE, o índice que apresentou maior correlação com a fitomassa foi o TVI, confirmando sua característica de bom preditor da fitomassa do algodoeiro, com correlação 0,88 contra 0,85 do NDVI, embora o maior coeficiente de determinação tenha sido observado para o NDVI que foi de 0,74. Também foi observado nessa data o bom desempenho do SAVI, que foi projetado por Huete (1988) para reduzir os efeitos do solo, com correlação de 0,86.

Três índices apresentaram bom desempenho aos 80 DAE, tendo essa época se apresentado como a melhor para predição da fitomassa do algodoeiro, onde foram observadas as melhores correlações da resposta espectral da cultura com relação à produção de fitomassa. É importante observar que o MTVI2, a despeito de seu fraco desempenho em estimar a fitomassa nos estádios mais avançados, na época de maior índice de área foliar esse IV apresentou um bom desempenho, tendo sido observada correlação com a produção da fitomassa igual ao obtida pelo TVI, cujo valor foi de 0,91. Entretanto, o NDVI provou ser o melhor IV para determinação da fitomassa no algodoeiro em pleno florescimento, com índice de correlação 0,92 e $R^2 = 0,80$.

Com a redução do índice de área foliar ocorrido aos 100 DAE, em algumas áreas o efeito do solo se tornou significativo na refletância do dossel. Nesse período o SAVI confirmou sua característica de atenuação do efeito do solo no sinal refletido pela vegetação, de forma que mostrou a melhor correlação com a fitomassa, seguido de perto pelo NDVI e TVI, com coeficientes de 0,83, 0,82 e 0,82, respectivamente.

Apesar de terem sido observados coeficientes de correlações adequados entre os IVs e a fitomassa total obtida em campo, pode-se perceber que houve redução dos coeficientes de determinação nas relações obtidas na avaliação realizada após o estágio de pleno florescimento. Esse efeito foi observado ao se adicionar a massa seca dos frutos à fitomassa total acima do solo.

Na primeira data de avaliação com o espectrorradiômetro, aos 60 DAE, todos os IVs se ajustaram ao modelo exponencial, onde os coeficientes de determinação variaram de 0,66 a 0,74. Embora a melhor correlação tenha sido observada para o TVI, foram o SAVI e o NDVI que melhor se ajustaram ao modelo, com $R^2=0,74$, seguido pelo TVI com $R^2=0,72$. Os piores desempenhos nessa data de avaliação foram observados para o MSAVI e MTVI2, como pode ser visto na Figura

38. Nessa época o algodão apresentava flores abertas e uma cobertura do solo ainda pequena, com altura de plantas variando desde 49 até 91 cm, dependendo do tratamento. O SAVI mostrou seu potencial para reduzir os efeitos do solo, apesar de não ter alcançado coeficiente de determinação superior ao NDVI.

Por outro lado, aos 80 DAE as plantas se encontravam em pleno vigor vegetativo, com altura média variando de 65 a 129 cm e com mais de 60% das maçãs cheias. Nessa época, os IVs apresentaram os melhores coeficientes de determinação, variando de 0,80 a 0,67. Tanto o NDVI quanto o TVI se ajustaram bem ao modelo exponencial, com coeficientes de determinação 0,80. Entretanto, o MSAVI continuou apresentando um desempenho fraco, com R^2 não ultrapassando 0,67. Nessa época o NDVI mostrou o melhor desempenho, com coeficiente de correlação de Pearson superior aos demais IVs. Li et al. (2001), estudando os efeitos da irrigação no NDVI e na refletância do algodoeiro, verificaram que o NDVI alcançava os maiores valores no período de máxima absorção de N, correlacionando assim as faixas do infravermelho próximo com a absorção de N e produção de fitomassa pela cultura.

À medida que as plantas envelhecem, aumentam seus teores de lignina, celulose e de carboidratos, e diminuem a proporção relativa de protoplasma. Com o envelhecimento da planta e início da senescência a concentração de N na folha tende a diminuir ocorrendo também o amarelecimento ou perda de folhas. Essa redução da área foliar aos 100 DAE, observada anteriormente nas Figuras 35e, 35f e 36, leva a redução dos IVs com relação ao IAF, apesar de ainda ser possível a determinação a contento do IAF através da espectrorradiometria de campo. Entretanto, devido à natureza não linear das relações entre o IAF e a fitomassa, foi observado que aos 100 DAE nenhum dos índices de vegetação estudados conseguiram coeficientes de determinação igual ou superior a 0,7, para determinação da fitomassa, apresentando desempenho baixo, com R^2 variando de 0,48 a 0,64, embora mantivessem boas correlações, variando de 0,73 a 0,83. Isso pode ser entendido através da avaliação da composição da fitomassa total da cultura.

Para determinação da fitomassa total do algodoeiro acima do solo considerou-se a massa seca do caule, ramos, folhas e frutos. À medida que aumenta a produção de frutos, aumenta a participação percentual da massa seca desses frutos na fitomassa total. Como visto anteriormente, a resposta espectral da vegetação está bem correlacionada à clorofila e ao teor de nitrogênio foliar, que por sua vez se reduzem com o desenvolvimento da planta (Figura 18). Considerando então a redução das folhas verdes na planta, mesmo com o aumento da fitomassa do algodoeiro devido à massa dos frutos, o início da senescência reduz a resposta espectral da vegetação nos comprimentos de onda entre 670 e 1050 nm, utilizados para determinação da refletância da vegetação verde. Nesse caso, os estádios fenológicos iniciais se mostraram mais adequados para predição da fitomassa total do algodoeiro, tendo à época de pleno florescimento do algodoeiro, 80 DAE, apresentado os melhores coeficientes de determinação e as mais altas correlações. Esse resultado está de acordo com os obtidos por Li et al. (2001), que observaram incremento no NDVI acompanhando o aumento da absorção de N, tendo esse IV atingido seu valor máximo de 0,76, na época de pleno florescimento do algodoeiro. Zarco-Tejada et al. (2005) também observaram que as melhores épocas para predição da produtividade e fitomassa do

algodoeiro são no início da floração e no pleno florescimento, tendo encontrado que os índices relacionados às características estruturais da planta, como o NDVI, RDVI e MTVI1 podem prever melhor o IAF e a produção de fitomassa, enquanto que outros IVs como o MSAVI e o MTVI2 mostraram baixo desempenho.

Com as equações obtidas e as correlações adequadas foi possível a determinação das equações preditivas para o IAF, através da espectrorradiometria de campo, conforme apresentado anteriormente nas Figuras 35, para o NDVI, RDVI, SAVI, MTVI2 e MSAVI, além da Figura 36 para o TVI, em todas as épocas de avaliação.

Também foi possível estabelecer as relações para estimativa para a produção de fitomassa do algodoeiro através dos IVs obtidos por espectrorradiometria de campo, como pode ser visto na Figura 37, para o NDVI, RDVI, SAVI, MTVI2 e MSAVI, e na Figura 38 para o TVI.

4.4. Avaliação dos índices de vegetação e resposta espectral do algodoeiro irrigado – Imagens do TM Landsat 5

O estudo das faixas espectrais mais adequadas para a caracterização de variáveis biofísicas das culturas tem levado muitos pesquisadores a avaliarem a capacidade preditiva de índices de vegetação obtidos através de sensores de faixa larga transportados a bordo de satélites, como o Thematic Mapper (TM) do Landsat 5, por serem úteis em trabalhos em grandes áreas e com custo muito reduzido (ZHAO et al., 2007; NAMAYANGA, 2002; THENKABAIL et al., 2000; WIEGAND et al., 1991). Essas pesquisas têm frequentemente comparado o desempenho dos IVs obtidos por espectrorradiometria e dos IVs obtidos por satélite, de forma a identificar os melhores preditores do IAF e da produção de fitomassa (HABOUDANE et al., 2004; BROGE e LEBLANC, 2000; SERRANO et al., 2000).

Assim um dos objetivos deste estudo foi determinar os IVs, o IAF e a fitomassa acumulada, observados através de imagens do satélite Landsat 5, obtidas nas datas correspondentes aos 34, 50 e 80 DAE, avaliando a capacidade dos IVs obtidos por satélite em estimar essas variáveis agrônomicas.

Para a conversão da atividade fotossintética na quantidade de fitomassa acumulada, se fez necessário a estimativa da eficiência do uso da luz, bem como o cálculo da fração evaporativa diária (Equações 27 e 28, respectivamente). Para estimativa do valor da fitomassa acumulada (Equação 29), foi utilizado o modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), de Monteith (1972) para vegetação verde, vistas nas Equações 21 a 23, que considera que a fitomassa acumulada é uma integral no tempo do produto entre a fração da radiação fotossinteticamente ativa (f_{PAR}) e a radiação de onda curta incidente diária, além do modelo de eficiência da luz de Field et al. (1995). Para a determinação do balanço de energia e avaliação da evapotranspiração, foi usado o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), combinado ao algoritmo CASA (Carnegie Ames Stanford Approach), quando foi obtida a APAR, necessária, juntamente com dados de superfície, para a estimativa da fitomassa acumulada usando imagens de satélite, ($Biom_{sat}$) (BASTIAANSEN e ALI, 2003; BRADFORD et al., 2005; FIELD et al., 1995).

É importante observar que devido a resolução da imagem Landsat, foram feitas as médias de quatro tratamentos, localizados dentro do mesmo pixel, divididos em duas faixas de doses de N, variando de 0 a 90 kg ha⁻¹, e de 180 a 270 kg ha⁻¹, tendo sido obtidos 6 pixels para cada uma das faixa de adubação nitrogenada, cujos valores máximo e mínimo são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18 para as três datas de avaliação, quais sejam, 34, 50 e 80 DAE, respectivamente. Para os IVs foram usadas relações entre refletâncias extraídas de cada imagem, sendo valores únicos por pixel.

Na Figura 39 são apresentadas as relações entre os índices de vegetação obtidos através das refletâncias das bandas 4, 3 e 2 das imagens do TM Landsat 5, e o índice de área foliar obtidos em condições de campo para o algodoeiro irrigado, nas datas de passagem do satélite.

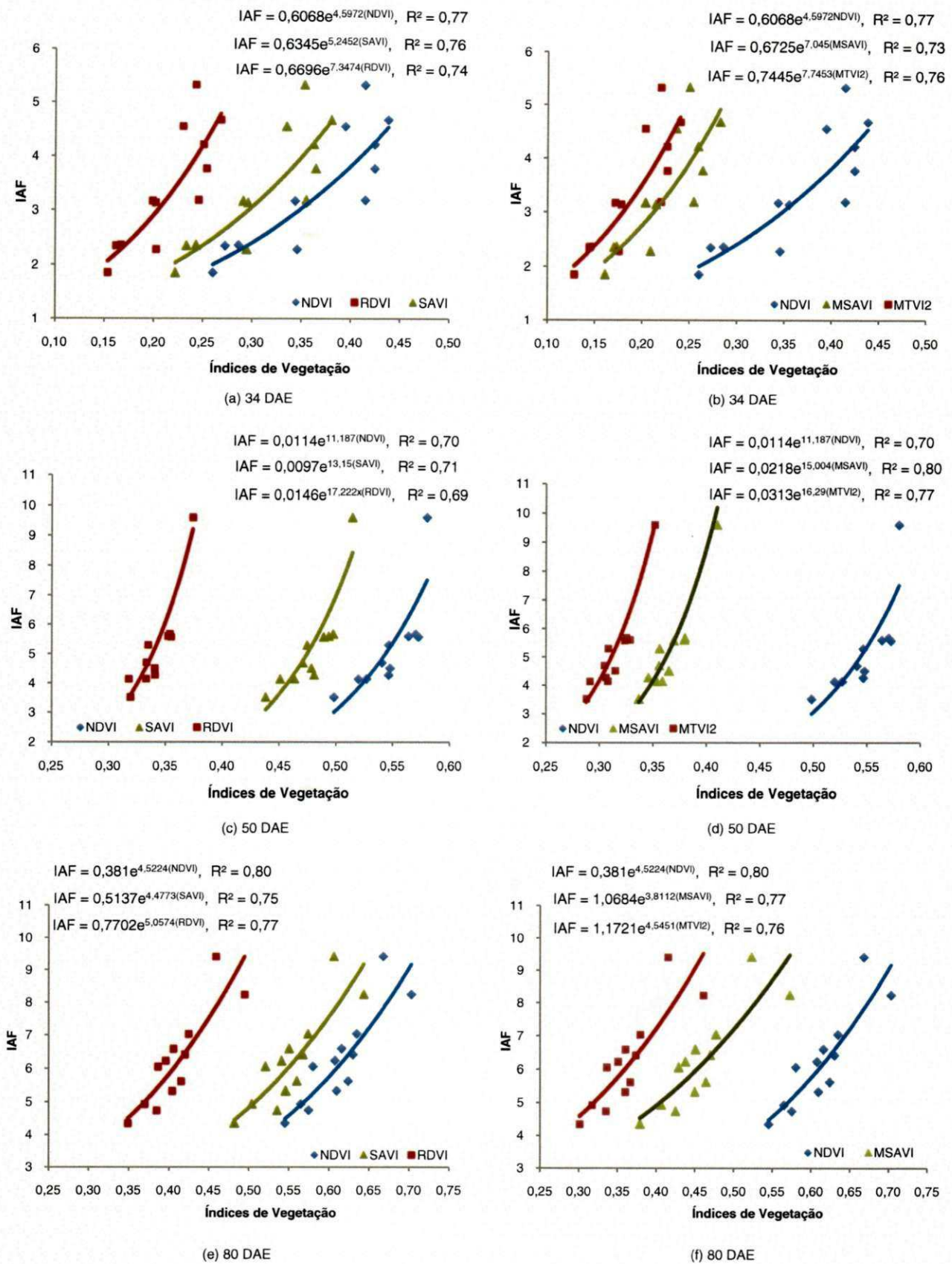


Figura 39. Equações preditivas do Índice de Área Foliar (IAF) observado em campo para o algodoeiro irrigado, como função dos índices de vegetação obtidos através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, para o NDVI, SAVI, RDVI, MTVI2 e MSAVI. (a) e (b) aos 34 DAE. (c) e (d) aos 50 DAE. (e) e (f) aos 80 DAE.

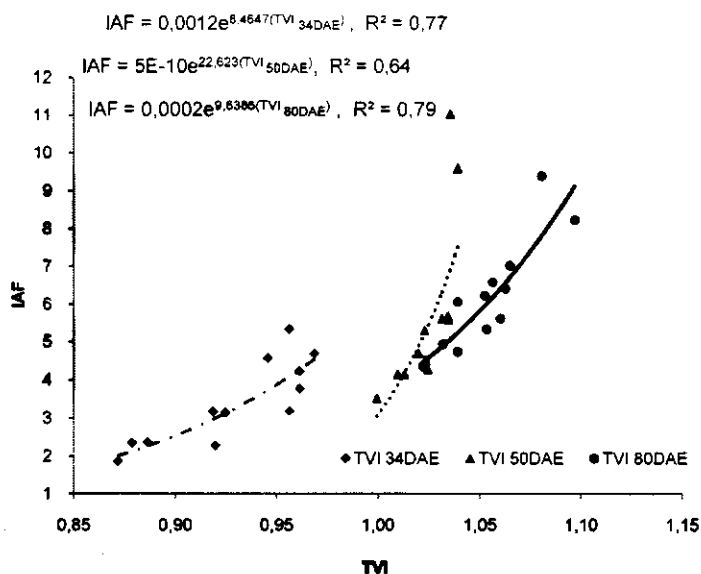


Figura 40. Equações preditivas para o Índice de Área Foliar (IAF) observado em campo como função do Índice de Vegetação Transformado (TVI) obtido através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, aos 34, 50 e 80 DAE.

Apesar da pequena quantidade de pontos por cada faixa da adubação nitrogenada, observou-se que os índices de vegetação obtidos através das imagens do satélite (IV_{sat}) cresceram com o incremento das doses de N e com o aumento da área foliar total observada em campo, conforme apresentado nas Tabelas 16, 17 e 18, para as imagens dos dias 01/11, 17/11 e 19/12/2008, respectivamente. Esse aumento pode ser observado no incremento em escala dos gráficos para os IV_{sat} apresentados na Figura 39, para o NDVI, RDVI, SAVI, TVI, MSAVI e MTVI2, e na Figura 40 para o TVI, separado mais uma vez a sua escala diferenciada, onde foi constatado que os mesmos apresentaram comportamento exponencial.

Tabela 16. Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de planta obtidas em campo, bem como dos IV_{sat} , do IAF_{sat} e da $Fitom_{sat}$ obtidos aos 34 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 01/11/2008 que correspondem à área do experimento.

Dose N (kg ha ⁻¹)	Altura	Fitom Total (t ha ⁻¹)	IAF	NDVI _{sat}	RDVI _{sat}	SAVI _{sat}	TVI _{sat}	MSAVI _{sat}	MTVI2 _{sat}	IAF _{sat}	Fitom _{sat} (t ha ⁻¹)	SPAD	Produtivi dade (kg ha ⁻¹)
0- 90 (kg ha ⁻¹)	46,53 - 53,96	1,55 - 2,88	1,85- 3,77	0,26 - 0,42	0,15- 0,25	0,22- 0,36	0,87- 0,96	0,16- 0,26	0,13- 0,23	0,26- 0,65	4,70- 10,43	40,26- 47,44	2833- 3228
180-270 (kg ha ⁻¹)	49,95- 56,93	2,28 - 3,76	2,35- 4,68	0,27- 0,44	0,16- 0,27	0,23- 0,38	0,88- 0,97	0,17- 0,28	0,14- 0,24	0,28- 0,71	5,13 - 10,43	48,92- 54,43	2967- 3729

Aos 34 DAE as plantas estavam pequenas e iniciando a formação dos botões florais. Nessa época, todos os IV_{sat} apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,73, onde o NDVI e o TVI se apresentaram como os melhores índices para determinação do IAF, com $R^2 = 0,77$, conforme apresentado nas Figuras 39a e 40, ambos com coeficiente de correlação de Pearson de 0,84 (Tabela 19). O SAVI e o MTVI2 também cresceram com o aumento da área foliar, ambos apresentando coeficientes de determinação de 0,76 e correlação de 0,84, mostrando o

potencial desses índices para determinação do IAF nesse estágio fenológico. Por outro lado, o RDVI e o MSAVI apresentaram os menores coeficientes de determinação, que foram de 0,74 e 0,73, respectivamente, embora tenham mantido altas correlações com o IAF em campo, cujos coeficientes foram 0,83 e 0,82.

Tabela 17. Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de planta obtidas em campo, bem como dos IVs, do IAF_{sat} e da $Fitom_{sat}$ obtidos aos 50 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 17/11/2008 que correspondem à área do experimento.

Dose N (kg ha ⁻¹)	Altura	Fitom Total (t ha ⁻¹)	IAF	NDVI _{sat}	RDVI _{sat}	SAVI _{sat}	TVI _{sat}	MSAVI _{sat}	MTVI2 _{sat}	IAF_{sat}	$Fitom_{sat}$ (t ha ⁻¹)	SPAD	Produtivi dade (kg ha ⁻¹)
0-90 (kg ha ⁻¹)	65,75 – 73,66	5,93 – 8,27	3,52- 5,58	0,50- 0,57	0,32- 0,35	0,44- 0,49	1,00- 1,03	0,34- 0,37	0,29- 0,32	1,02- 1,22	12,67 – 19,21	40,91- 44,34	2833- 3228
180-270 (kg ha ⁻¹)	71,00- 89,45	7,53 – 9,75	4,69- 11,03	0,54- 0,58	0,33- 0,37	0,47- 0,50	1,02- 1,04	0,36- 0,51	0,30- 0,34	1,09- 1,33	14,26- 17,98	46,56- 52,91	2967- 3729

Tabela 18. Valores mínimos e máximos para o IAF, a fitomassa e a altura de planta obtidas em campo, bem como dos IVs, do IAF_{sat} e da $Fitom_{sat}$ obtidos aos 80 DAE para os 12 pixels na imagem do TM Landsat 5 do dia 19/12/2008 que correspondem à área do experimento.

Dose N (kg ha ⁻¹)	Altura	Fitom Total (t ha ⁻¹)	IAF	NDVI _{sat}	RDVI _{sat}	SAVI _{sat}	TVI _{sat}	MSAVI _{sat}	MTVI2 _{sat}	IAF_{sat}	$Fitom_{sat}$ (t ha ⁻¹)	SPAD	Produtivi dade (kg ha ⁻¹)
0-90 (kg ha ⁻¹)	75,95 – 86,00	11,58-18,69	4,35- 6,23	0,55- 0,61	0,37- 0,42	0,48- 0,56	1,02- 1,06	0,38- 0,46	0,30- 0,37	1,15- 1,66	13,27- 21,28	36,85- 39,83	2833-3228
180-270 (kg ha ⁻¹)	83,25- 107,05	13,54-24,34	6,06- 9,41	0,59- 0,70	0,39- 0,49	0,52- 0,61	1,04- 1,10	0,43- 0,57	0,34- 0,46	1,37- 2,81	15,32- 26,09	44,11- 51,65	2967-3729

Tabela 19. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de vegetação** obtidos através das imagens do TM Landsat 5 e o IAF e a fitomassa obtidos em campo no algodoeiro irrigado.

Época	Correlação	NDVI	RDVI	SAVI	TVI	MSAVI	MTVI2	IAF_{sat}	$Fitom_{sat}$
34 DAE	IAF	0,84	0,83	0,84	0,84	0,82	0,84	0,84	0,88
	Fitomassa	0,66	0,64	0,65	0,66	0,63	0,65	0,64	0,75
50 DAE	IAF	0,76	0,77	0,77	0,71	0,85	0,82	0,81	0,77
	Fitomassa	0,95	0,90	0,94	0,93	0,87	0,92	0,91	0,84
80 DAE	IAF	0,88	0,87	0,86	0,88	0,87	0,87	0,83	0,87
	Fitomassa	0,92	0,91	0,90	0,92	0,91	0,90	0,88	0,97

(**) Todos os IVS foram significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t

É possível observar um aumento na amplitude dos valores obtidos para os índices de vegetação na imagem do dia 17/11/2008, correspondendo ao 50º DAE. Os índices de vegetação cresceram com o aumento do IAF, seguindo o modelo exponencial, com coeficientes de determinação variando de 0,64 a 0,80. Nessa época os efeitos da segunda aplicação da adubação nitrogenada se tornaram acentuados, com diferenças grandes entre altura de plantas e IAF para cada faixa de adubação selecionada (Tabela 17). O IAF observado em campo variou de 3,52 a 5,58 para os tratamentos com N entre 0 e 90 kg ha⁻¹, e entre 4,69 e 11,03 para os tratamentos com N variando entre 180 e 270 kg ha⁻¹, mostrando que os tratamentos com maiores

concentrações de N estavam em crescimento vegetativo acelerado e muito superior aos tratamentos com N variando entre 0-90 kg ha⁻¹. Um fato importante é que a medição em campo foi feita apenas três dias após a passagem do satélite, mas numa fase de crescimento vegetativo intenso pode vir a acarretar alguma diferença nos valores obtidos para o IAF. Embora apresentassem coeficientes de determinação não muito bons aos 50 DAE, todos os IVs_{sat} mantiveram boas correlações com o IAF obtido em campo, que variaram de 0,71 a 0,85, conforme apresentado na Tabela 18. Nessa fase, o MSAVI se apresentou como o melhor índice para estimativa do IAF, com coeficiente de determinação de 0,80, com o maior coeficiente de correlação para a data que foi de 0,85. Seu desempenho foi seguido de perto pelo MTVI2, com R² = 0,77 e correlação de 0,82. Os outros IVs não apresentaram bom desempenho, embora o NDVI e o SAVI tenham de mantido com coeficientes de determinação de 0,70 e 0,71, respectivamente. O RDVI e o TVI apresentaram os piores desempenhos nessa época, onde foi possível observar o baixo desempenho do TVI, mostrando saturação para IAFs superiores a 5, sem conseguir acompanhar o crescimento da área foliar do período, com R² = 0,64 e o mais baixo coeficiente de correlação registrado, conforme mostrado na Tabela 18.

Aos 80 DAE, registrado como o período de pleno florescimento, foram obtidos coeficientes de correlação de Pearson que variaram de 0,86 a 0,88, onde todos os índices de vegetação obtidos através das imagens seguiram o modelo exponencial, com os melhores coeficientes de correlação encontrados entre as três datas de avaliação, que variaram de 0,75 a 0,79. Desse modo, esse estágio fenológico se mostrou o mais adequado para a estimativa do IAF, onde o NDVI e o TVI foram os índices que melhor se ajustaram ao modelo, ambos com coeficientes de determinação de 0,79 e correlação de Pearson dada por 0,88. O SAVI, apesar de ter apresentado o menor coeficiente de determinação, que foi de 0,75, seguiu muito bem o NDVI, sem apresentar saturação até seu máximo valor, conforme apresentado na Figura 39e. Os outros índices também apresentaram bom desempenho, com R² de 0,77, 0,77 e 0,76, para o RDVI, MSAVI e MTVI2, que apresentaram coeficientes de correlação de 0,83, 0,82 e 0,84, respectivamente.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de vegetação e a fitomassa do algodoeiro obtida em campo são apresentados na Tabela 19. A correlação entre os IVs e a fitomassa foi positiva e acompanhou o aumento da produção da fitomassa da cultura, onde os menores valores foram observados na primeira data de avaliação, aos 34 DAE, sendo constatadas as menores correlações, que variaram de 0,63 a 0,66, enquanto que nos estádios fenológicos posteriores, essas correlações cresceram variando de 0,87 a 0,95 aos 50 DAE e de 0,90 a 0,92 aos 80 DAE.

Na primeira data de avaliação, os índices que melhor se correlacionaram com a produção da fitomassa do algodoeiro foram o NDVI e o TVI, apesar de todos os IVs_{sat} terem apresentado correlações próximas e inferiores a 70%. Esse comportamento diferiu do observado para o IAF para a mesma data, onde foram observados altos coeficientes de correlação com os índices de vegetação, (superiores a 82%), indicando que os IVs escolhidos são úteis para estimativa do IAF nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura, mas não para a estimativa da fitomassa. Isso pode ser explicado observando-se o comportamento do IAF obtido por satélite (IAF_{sat}), que

apesar de ter mantido altas correlações com o IAF de campo nas três datas de avaliação, não apresentou boa correlação com a fitomassa aos 34 DAE, aumentando com o incremento da mesma ao longo das épocas.

Esse comportamento pode ser visualizado nas Figuras 41 e 42, onde são apresentadas as relações dos índices de vegetação em resposta ao aumento da produção da fitomassa do algodoeiro obtida em campo. Pode-se constatar que em todas as épocas os IVs cresceram com o aumento da fitomassa, seguindo o modelo exponencial. Entretanto, aos 34 DAE, os IVs estudados não mantiveram coeficientes de determinação adequados, que variaram de 0,40 a 0,44, indicando que essa data de avaliação é inapropriada para estimativa da produção da fitomassa.

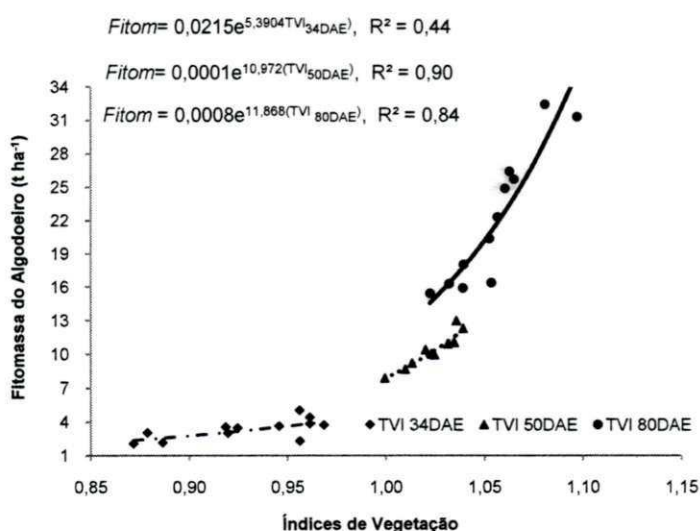
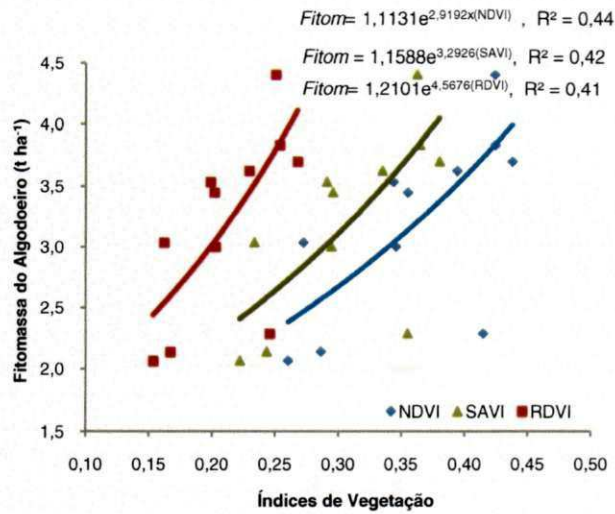
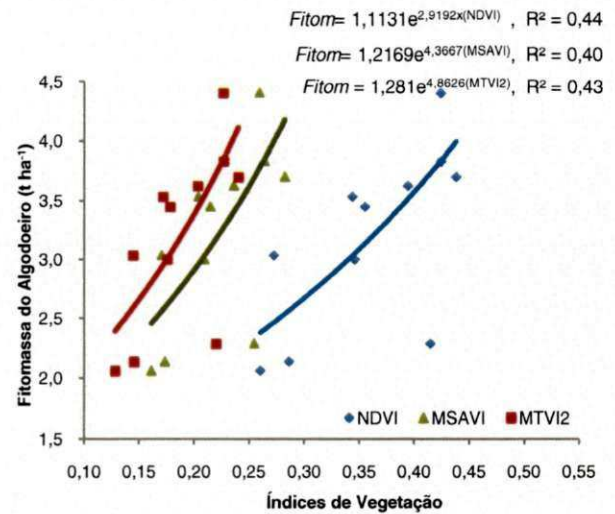


Figura 41. Equações preditivas para a fitomassa do algodoeiro, como função do Índice de Vegetação Transformado (TVI) obtido através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, aos 34, 50 e 80 DAE.

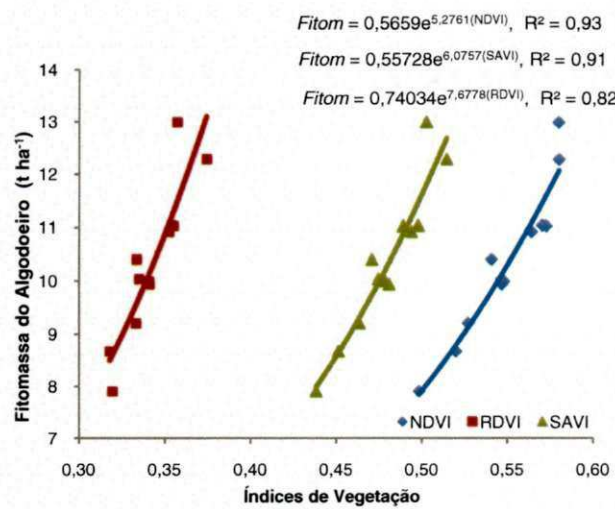
À medida que as plantas crescem, aumenta o consumo de nutrientes pela planta. O fornecimento da segunda aplicação da adubação nitrogenada aos 38 DAE garantiu estoque extra de N às plantas que, aos 50 DAE, responderam com um rápido crescimento vegetativo, expandindo sua área foliar e aumentando de 2,6 a 3,8 vezes a produção de fitomassa com relação à medição anterior (Tabelas 16 e 17). Parte dessa elevação da fitomassa deveu-se ao crescimento dos frutos, uma vez que o aumento do IAF observado em campo variou de 1,9 a 2,35 vezes o observado na avaliação anterior, aos 34 DAE. Esse incremento da cobertura vegetada e das estruturas verdes pode ser observado com o aumento dos valores de todos os IV_{sat} , cujas amplitudes foram dobradas aos 50 DAE, quando comparados aos valores mais baixos dos índices de vegetação aos 34 DAE. Nessa data o NDVI foi o IV que melhor representou o crescimento da fitomassa da cultura, com coeficiente de determinação de 0,93, e alto coeficiente de correlação que foi de 0,95.



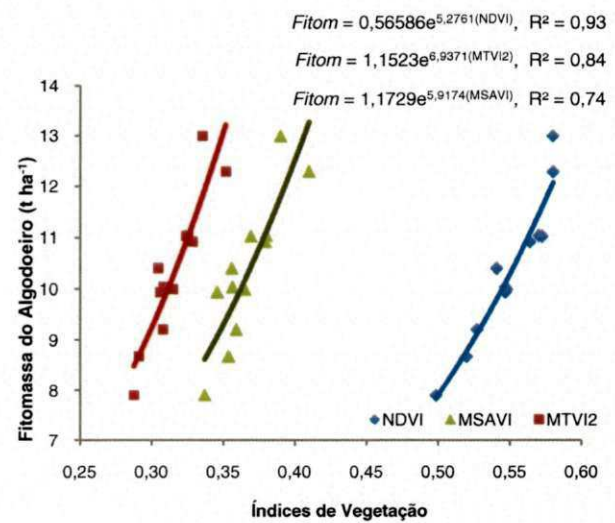
(a) 34 DAE



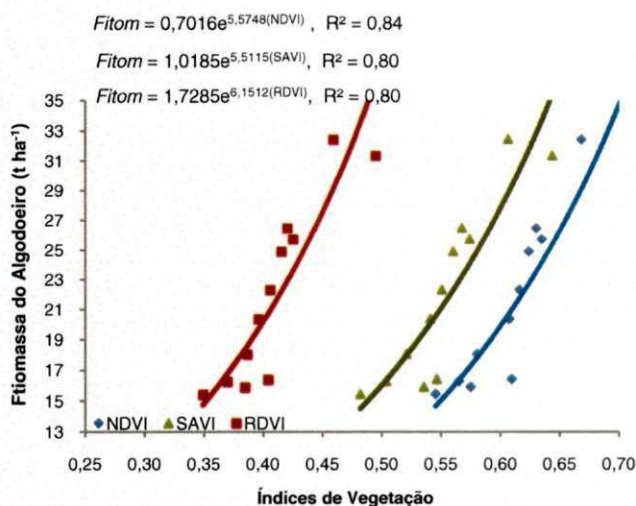
(b) 34 DAE



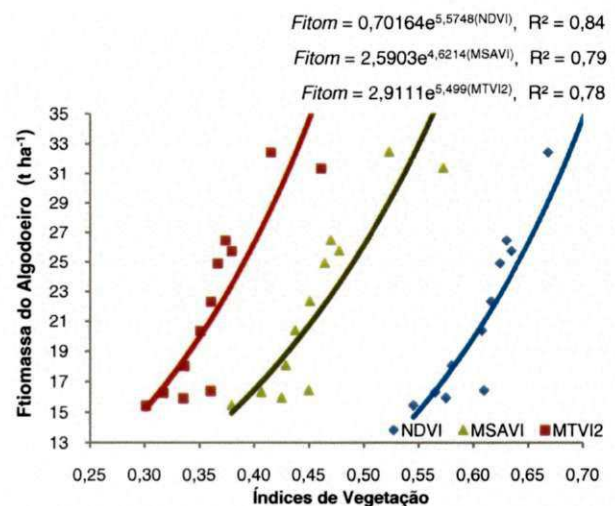
(c) 50 DAE



(d) 50 DAE



(e) 80 DAE



(f) 80 DAE

Figura 42. Equações preditivas da fitomassa total como função dos índices de vegetação obtidos através das imagens do Mapeador Temático Landsat 5, em três estádios fenológicos, para o NDVI, SAVI, RDVI, MTVI2 e MSAVI (a) e (b) aos 34 DAE. (c) e (d) aos 50 DAE. (e) e (f) aos 80 DAE.

Seu desempenho foi seguido pelo SAVI e o TVI, com coeficientes de determinação de 0,91 e 0,90, e correlações de 0,94 e 0,93, respectivamente. Outros índices como o MTVI2 e o RDVI também apresentaram bom desempenho, com R^2 de 0,84 e 0,82, e coeficientes de correlação de 0,92 e 0,90, respectivamente. O menor desempenho nessa época de avaliação foi observado para o MSAVI, com $R^2=0,74$, e correlação de 0,87.

Aos 80 DAE, considerado o estágio fenológico de pleno florescimento do algodoeiro, as maçãs estavam cheias até o final do terço médio das plantas, com algumas plantas já apresentando um capulho aberto. Nessa fase a massa seca dos frutos (MSF) influenciou consideravelmente a fitomassa total, onde foi constatada a MSF cerca de duas vezes maior que a massa seca das folhas, caules e ramos (MSPA). Para efeito comparativo, é importante observar que aos 34 DAE, a MSF não atingiu 15% do total da fitomassa total, elevando-se aos 50 DAE para 38% e aos 80 DAE alcançando 64% da fitomassa total acima do solo.

Nesse estágio, foi observado que a adição da massa seca dos frutos no cômputo da fitomassa do algodoeiro provocou a redução dos coeficientes de correlação dos índices de vegetação observados através das imagens com a fitomassa total obtida em campo, bem como a diminuição dos coeficientes de determinação de todos os IVs_{Sat} , quando comparados aos valores obtidos na medição anterior. Apesar disso, os coeficientes de correlação de Pearson foram altos, variando de 0,90 a 0,92 para todos os IVs_{Sat} . Todos os IVs seguiram o modelo exponencial com R^2 variando de 0,78 a 0,84. Os dois índices de vegetação que apresentaram melhor desempenho nessa fase foram o NDVI e o TVI, com coeficientes de determinação de 0,83, como podem ser observados nas Figuras 41 e 42, ambos apresentando correlação de 0,92. O SAVI e o RDVI também cresceram em resposta ao aumento da fitomassa, ambos com coeficientes de determinação 0,80 e correlação 0,87. Já o MSAVI e o MTVI2 apresentaram os menores coeficientes de determinação, que foram 0,79 e 0,78 com coeficientes de correlação de 0,91 e 0,90, respectivamente.

Embora a quantidade de pixels tenha sido pequena para melhor precisão nas equações, foi possível identificar o aumento dos índices de vegetação como resposta a cada uma das faixas da adubação nitrogenada, com as equações ajustadas e obtenção de altas correlações tanto em relação ao IAF quanto a produção de fitomassa. Dessa forma, foi possível a conversão das relações em equações preditivas para determinação do IAF, (Figuras 39 e 40), bem como as equações para estimativa da fitomassa (Figuras 41 e 42), utilizando dados de banda larga, com imagens do TM Landsat 5 para todos os IVs_{Sat} .

Como forma de avaliar a capacidade preditiva das equações obtidas através das imagens de satélite, é importante analisar a relação entre as variáveis biofísicas obtidas através das imagens de satélite com relação aquelas obtidas em campo. No modelo SEBAL, o IAF é obtido através do SAVI, dada por uma equação empírica (Equação 34), utilizada por Allen et al. (2002), padronizada para diversas culturas e usada no método de determinação da evapotranspiração da FAO. Entretanto, a dependência do coeficiente de ajuste do SAVI limita o IAF obtido nesse modelo ao valor de 6, cujo valor correspondente do SAVI seria 0,687. Apesar disso, foi observado que o IAF obtido em campo está altamente correlacionado com o IAF observado através das imagens do

TM Landsat 5 em todas as datas de avaliação, sugerindo assim a necessidade de ajuste da equação para as condições de clima e solo estudadas.

Foi observado que o IAF_{sat} obtido através das imagens do Landsat 5, apresentou-se cerca de 3 vezes menor que o obtido em campo, embora tenham sido constatadas correlações de 0,84, 0,81 e 0,80, para as avaliações realizadas aos 34, 50 e 80 DAE, respectivamente (Figura 43).

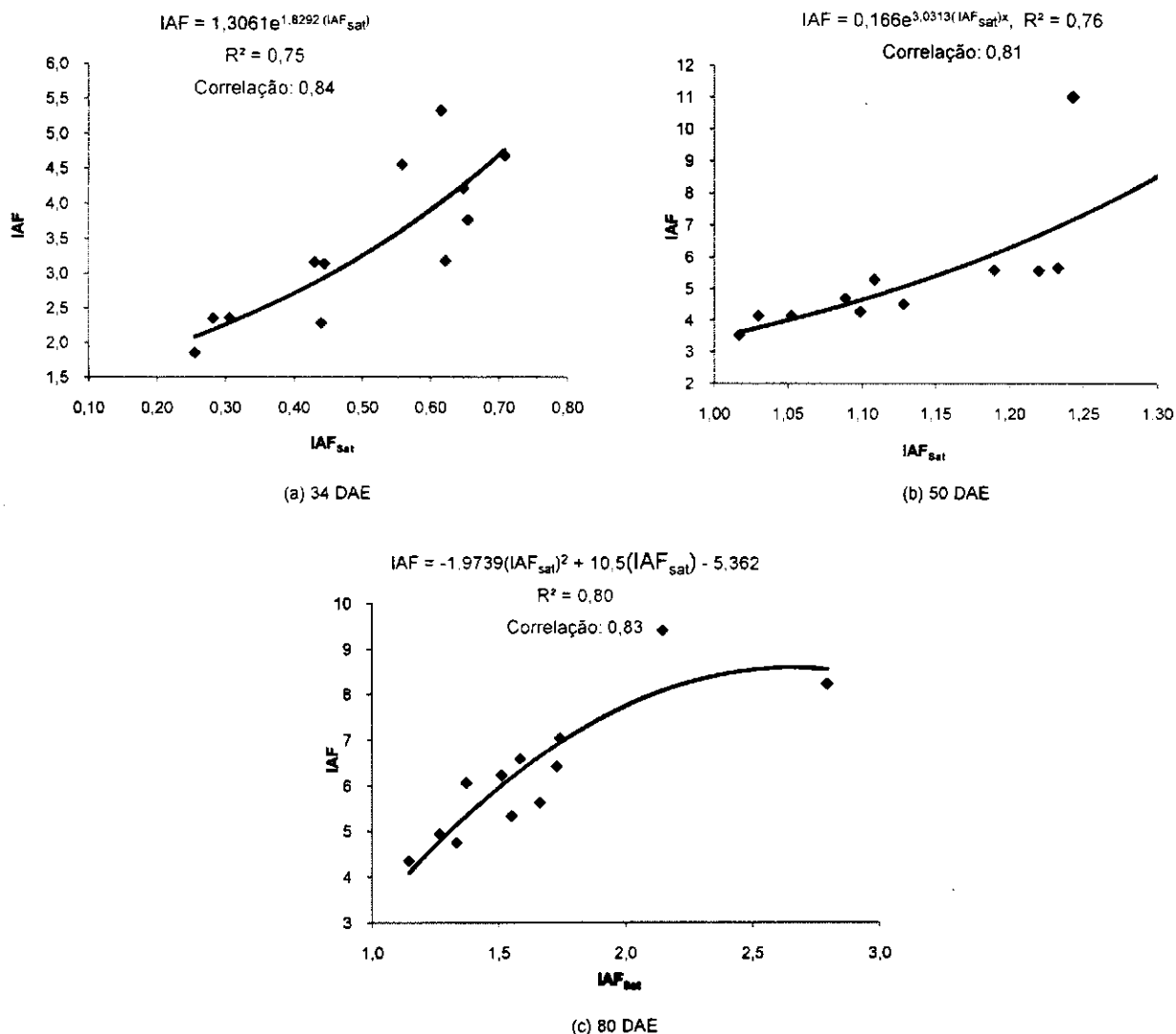


Figura 43. Relações entre os IAFs obtidos em campo e os IAFs obtidos através de imagens de satélite. (a) aos 34 DAE. (b) aos 50 DAE. (c) aos 80 DAE.

O IAF obtido através das imagens cresceu exponencialmente acompanhando o aumento do IAF constatado em campo nas duas primeiras épocas de avaliação, com coeficientes de determinação de 0,75 e 0,76 aos 34 e 50 DAE, respectivamente. Por outro lado, na época de máximo NDVI, aos 80 DAE, esse índice se ajustou melhor ao modelo polinomial quadrático em resposta ao crescimento do IAF obtido em campo, com máximo valor observado de 2,66, quando o IAF observado no campo atingiu 8,6. A partir desse ponto constatou-se o efeito de saturação relatado na literatura (KO et al., 2006; ZARCO-TEJADA et al., 2005). Resultados semelhantes

também foram observados por Haboudane et al. (2004), que constataram que as discrepâncias entre o IAF obtido em campo e o estimado através das imagens de satélites variavam de acordo com a cultura em estudo. Coonrod e McDonnell (2001), ao estudarem a evapotranspiração e o índice de área foliar em nove áreas florestadas ao longo do Rio Grande no México, também constataram que o IAF obtido através da imagem Landsat 7 subestimava de 1,24 a 2,83 vezes o IAF obtido em campo, dependendo da cultura estudada e da disponibilidade de água à mesma.

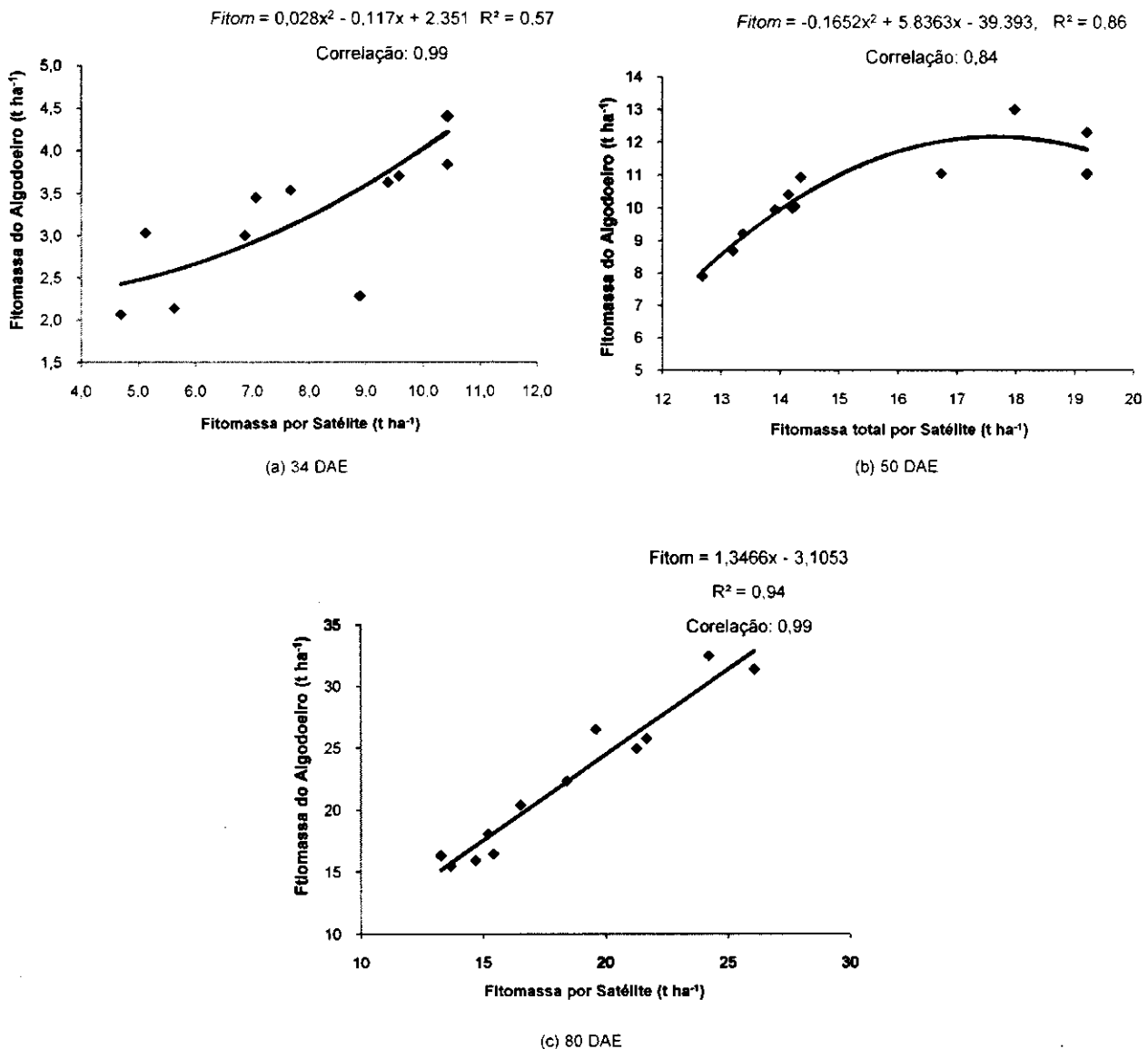


Figura 44. Relações entre a fitomassa do algodoeiro em campo e a fitomassa total obtida através das imagens de satélite, por data de passagem do satélite. (a) aos 34 DAE. (b) aos 50 DAE. (c) aos 80 DAE.

A produção de fitomassa estimada através dos índices de vegetação também apresenta os efeitos da não linearidade observada para o IAF. Aos 34 DAE, apesar de apresentar alta correlação, a fitomassa obtida através dos IVS_{sat} não se ajustou adequadamente a nenhum

modelo, observando-se baixo coeficiente de determinação para o modelo polinomial quadrático, que foi de 0,57, além de grande dispersão nos menores valores da fitomassa observada em campo. Entretanto, a fitomassa do algodoeiro cresceu rapidamente acompanhando o desenvolvimento das plantas, que pôde ser observado aos 50 e 80 DAE, no início da floração e no pleno florescimento. Na avaliação realizada aos 50 DAE, a produção da fitomassa se ajustou melhor ao modelo polinomial quadrático, apresentando coeficiente de determinação de 0,86 e de correlação de 0,84. O teste t para a curva estimada foi significativo ($< 0,001$), indicando a forte relação entre a produção da fitomassa do algodoeiro observada no campo e aquela obtida através dos dados do TM Landsat 5. Nessa época de avaliação foi observado que a $fitom_{sat}$ atingiu o máximo valor em $17,68 \text{ t ha}^{-1}$ quando a fitomassa do algodoeiro constatada em campo foi de $12,21 \text{ t ha}^{-1}$. Entretanto, a fitomassa total observada através das imagens do satélite ($fitom_{sat}$) subestimou a amplitude dos maiores valores da fitomassa constatada no campo aos 80 DAE, tendo sido observado um ajuste polinomial quadrático, ainda com tendência crescente para os maiores valores da fitomassa do algodoeiro, com coeficiente de determinação de 0,94 e correlação perfeita ($r > 0,99$), mostrando-se altamente significativo ($< 0,001$) no teste t. Resultados semelhantes também foram obtidos por Zheng et al. (2004), que ajustaram o modelo de predição da fitomassa retirando a linearização imposta nos modelos dos índices de vegetação, ao corrigir o NDVI por um modelo sigmoidal, que se aproxima melhor do comportamento de desenvolvimento das plantas. Assim, eles obtiveram uma relação altamente significativa e com coeficiente de determinação alto entre o NDVI e a fitomassa de forma a corrigir tanto os valores superestimados para baixas produções de fitomassa, quanto o efeito de redução dos valores para fitomassas elevadas.

4.5. Desempenho e Produtividade do Algodoeiro

A produção da fitomassa é fundamental para a estimativa da produtividade do algodoeiro, podendo essa última ser avaliada em função da quantidade e massa de capulhos por área. A medida que as plantas crescem, a contribuição da massa seca dos frutos (MSF) na produção de fitomassa total aumenta. Uma vez que o crescimento e desenvolvimento dos frutos dependem da capacidade fotossintética da planta e sua nutrição, a relação existente entre a produção de massa seca e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada ou absorvida pela vegetação tem sido amplamente usada para definir a eficiência de uso da radiação em várias culturas, sendo amplamente aceito que em plantas saudáveis e adequadamente supridas de água e nutrientes, a fotossíntese líquida e a produção de fitomassa são proporcionais à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (MONTEITH, 1972). Por outro lado, a absorção da radiação incidente pelas culturas depende não somente do seu índice de área foliar (IAF), posição solar, geometria e tamanho da folha, ângulo de distribuição, idade, arranjo das plantas, época do ano e nebulosidade (BROGE e LEBLANC, 2001), mas ainda da espécie cultivada, das condições meteorológicas e de práticas de manejo da cultura (BUSCAGLIA e VARCO, 2002). Adicionalmente, a distribuição das folhas em várias camadas leva a diferentes níveis de interceptação da radiação, o que conduz a não linearidades entre a taxa fotossintética e a densidade de fluxo de radiação dentro do dossel, de forma que, para estimativa da produtividade da cultura devem ser avaliadas as diferentes condições de absorção da radiação, sob pena de incorrer-se em erro na sua estimativa (RUSSELL et al., 1989).

Considerando-se então a estreita relação entre a produção de fitomassa e o IAF, foi avaliada a capacidade preditiva desse índice com relação à fitomassa e a produtividade do algodoeiro, utilizando-se os dados obtidos no estágio de pleno florescimento. A escolha dessa época de avaliação se deveu ao fato dela ter sido considerada a melhor época para predição do IAF do algodoeiro, uma vez que apresentou as melhores correlações entre os índices de vegetação, tanto na espectrorradiometria de campo como para os dados de satélite, adicionalmente ao sincronismo entre a obtenção dos dados de espectrorradiometria de campo e de satélite aos 80 DAE. Dessa forma, nos dados de espectrorradiometria de campo foram usadas as equações obtidas para o IAF e a produção da fitomassa derivadas do IV que apresentou melhor desempenho nessa época, que foi o NDVI.

Tomando como base todos os valores obtidos com o espectrorradiômetro em campo aos 80 DAE, observou-se que a produção de fitomassa cresceu com o aumento do IAF, seguindo o modelo logarítmico, com tendência a saturação para valores de IAF acima de 9, e coeficiente de determinação de 0,84, conforme apresentado na Figura 45c. Considerando-se a alta correlação obtida para a fitomassa em resposta ao IAF obtido por espectrorradiometria, observado como 0,93, tendo se apresentado altamente significativo no teste t, esse método de estimativa da produção da fitomassa mostrou-se adequado e melhor correlacionado que aqueles obtidos através dos IVs, mesmo considerando o melhor índice de vegetação para essa época de avaliação, que

foi o NDVI, cujo coeficiente de correlação com a fitomassa do algodoeiro foi de 0,92 e $R^2=0,80$, como visto anteriormente na Figura 42. Antagonicamente, as estimativas da produtividade em resposta ao IAF ou à produção de fitomassa obtidos através de espectrorradiometria apresentaram baixa significância e baixos coeficientes de correlação de Pearson, ambos de 0,60, nessa mesma época, conforme apresentado nas Figuras 45a e 45b.

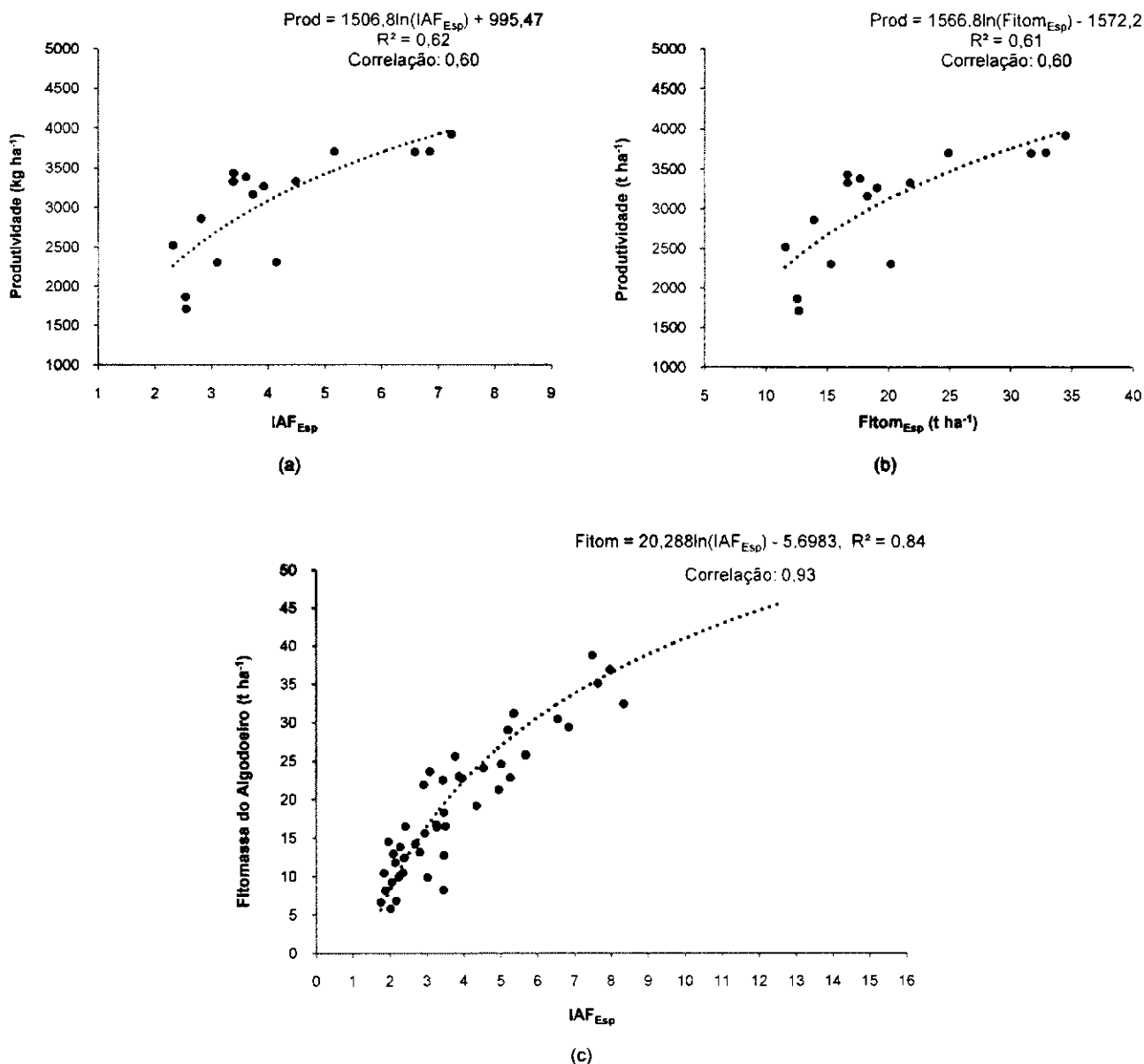


Figura 45. Relações derivadas do IAF e da produção de fitomassa do algodoeiro obtidas por espectrorradiometria de campo como preditores da produtividade no estágio de pleno florescimento (80 DAE) do algodoeiro. (a) Produtividade estimada em resposta ao crescimento do IAF; (b) Produtividade estimada em resposta ao aumento da fitomassa; (c) Produção de fitomassa em resposta ao aumento do índice de área foliar.

A produtividade cresceu com o aumento do IAF, apresentando pequeno ajuste ao modelo logarítmico, com coeficiente de determinação de 0,62, tendo mostrado crescimento similar em resposta ao crescimento da fitomassa observada por espectrorradiometria aos 80 DAE, com

coeficiente de determinação de 0,61. Esse comportamento pode ser explicado devido às não linearidades presentes quando da determinação da produtividade, indicando que para o monitoramento do algodoeiro através de espectrorradiometria nessa época é mais adequada a avaliação das variáveis biofísicas, como o IAF e a fitomassa, como indicadores das condições de vigor da cultura em resposta aos índices de vegetação.

Por outro lado, a produtividade estimada tanto com o IAF como com a produção de fitomassa total obtidos através das imagens do TM Landsat 5, apresentaram altas correlações com esses parâmetros aos 80 DAE, conforme apresentado nas Figuras 46a e 46b.

A produtividade estimada através do IAF_{Sat} cresceu linearmente em resposta a elevação do índice de área foliar, tendo sido observada a máxima produtividade de 3729 kg ha^{-1} , quando o IAF_{Sat} foi 2,8. A produtividade assim estimada apresentou coeficiente de correlação de 0,91 e coeficiente de determinação de 0,83 com o IAF_{Sat} . Apesar disso, é importante observar a redução entre os índices de vegetação obtidos em campo e por satélite, onde foi constatado que o IAF_{Sat} de 2,8, subestimou em cerca de 3,05 vezes o índice de área foliar observado em campo na mesma época, tendo sido obtido como 8,56, de acordo com a equação obtida na Figura 43c. Embora tenha apresentado o efeito de redução do IAF observado por satélite, é possível que sua alta correlação com o IAF real (Figura 43c), bem como com a produção de fitomassa constatada na avaliação de campo (Figura 46c), tenha contribuído para a obtenção desse resultado na estimativa da produtividade através do IAF_{Sat} . Esse efeito de redução do IAF já foi reportado na literatura, onde foram constatados que o índice de área foliar em campo era de 0,88 a 2,37 vezes maior que o IAF estimado através das imagens do Landsat 7 (MEGOWN et al., 2004; COONROD e McDONNELL, 2001).

Por sua vez, a fitomassa estimada pelo modelo CASA no estágio de pleno florescimento, também apresentou bom desempenho na estimativa da produtividade, mantendo correlação de 85% com a mesma. Pode-se observar na Figura 46b que a produtividade estimada cresceu exponencialmente com o aumento da $fitom_{Sat}$, com uma produtividade mínima observada de 2930 kg ha^{-1} para a $fitom_{Sat}$ de $13,27 \text{ t ha}^{-1}$, com $R^2=0,84$. É importante observar que a fitomassa real constatada em campo foi de $14,76 \text{ t ha}^{-1}$, para o valor de $13,27 \text{ t ha}^{-1}$ obtido através das imagens, sendo a primeira cerca de 11,23% maior do que a obtida por satélite, conforme equação vista anteriormente na Figura 44c.

A produção da fitomassa cresceu exponencialmente com o aumento do IAF_{Sat} , apresentando alta correlação, observada como 0,88, além de alto coeficiente de determinação, que foi de 0,88 para essa época de avaliação (Figura 46c). A relação obtida para a produção da fitomassa assim estimada mostrou-se adequada para avaliação das condições gerais da cultura e seu potencial produtivo, embora tenham sido constatadas melhores correlações entre a fitomassa do algodoeiro e os índices de vegetação por satélite, onde foi observado que o melhor IV aos 80 DAE foi o NDVI, que apresentou correlação de 0,92 (Tabela 18) com a produção de fitomassa, todavia com coeficiente de determinação menor, dado por 0,84 conforme visto anteriormente na Figura 42f.

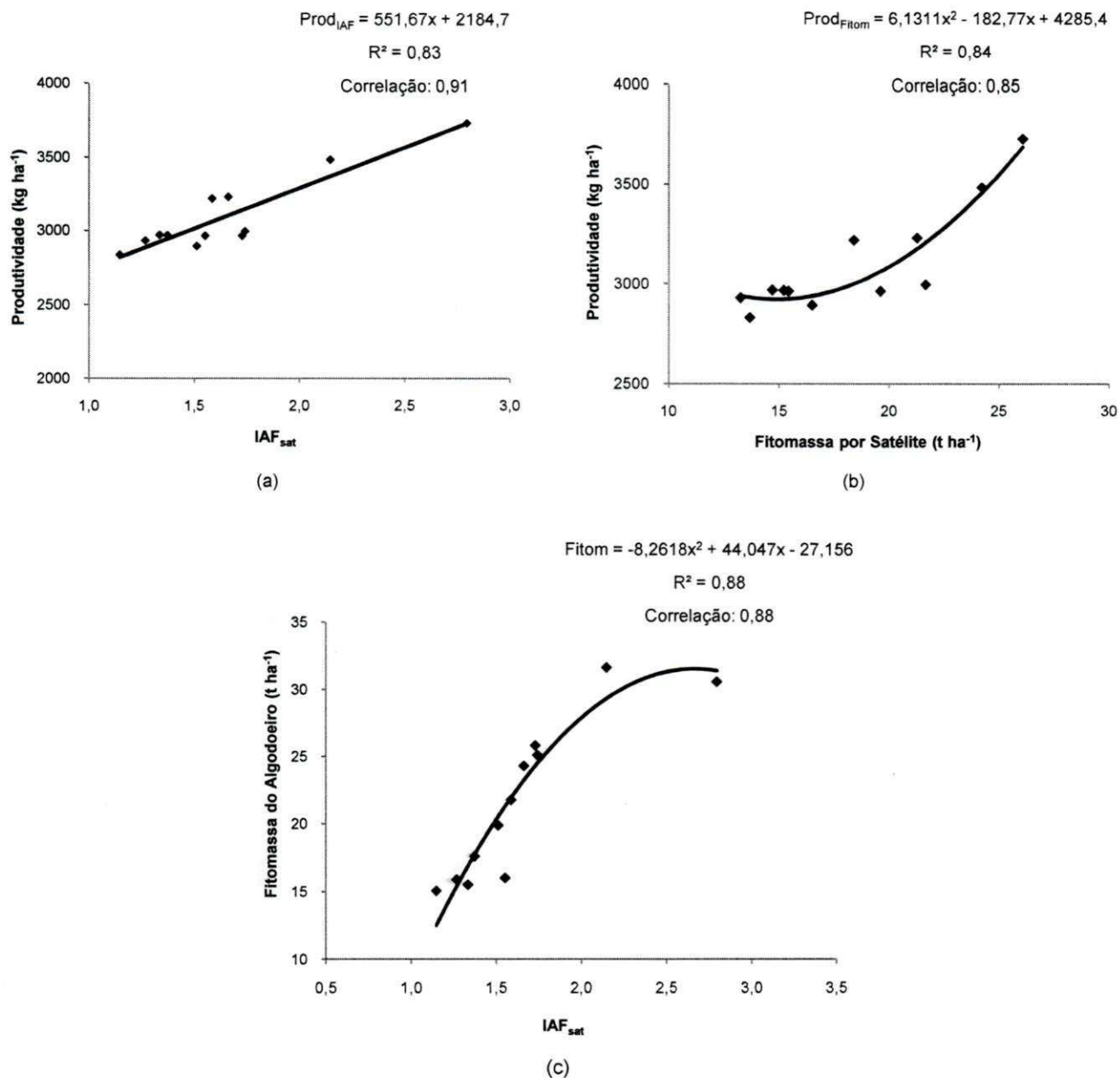


Figura 46. Relações derivadas do IAF e da produção de fitomassa, obtidos através dos dados das imagens do satélite Landsat 5, como preditores da produtividade no estágio de pleno florescimento (80 DAE) do algodoeiro. (a) Produtividade estimada em resposta ao crescimento do IAF; (b) Produtividade estimada em resposta ao aumento da fitomassa; (c) Produção de fitomassa em resposta ao aumento do índice de área foliar.

Assim, devido as não linearidades inerentes quando da estimativa da produtividade, é importante a avaliação do desempenho geral do algodoeiro, estimando-se inicialmente o índice de área foliar e a produção de fitomassa do algodoeiro, para identificação do vigor da cultura e avaliação do seu potencial produtivo. Apesar de bons estimadores da produtividade, essas variáveis biofísicas não seguiram um padrão único quando usados dados obtidos por

espectrorradiometria de campo ou por satélite, tendo esse último método apresentado melhores coeficientes de determinação que o primeiro.

Os índices de vegetação obtidos através das imagens de satélite apresentaram desempenho similar aos observados por espectrorradiometria de campo na predição da produção de fitomassa do algodoeiro, tendo esse último método a vantagem de poder executar a avaliação a qualquer época e também ser feito por tratamento, oferecendo melhor precisão para áreas menores. Adicionalmente, foi observado que os IVs obtidos através do espectrorradiômetro manual apresentaram melhores correlações para predição do IAF do que aqueles índices obtidos através das imagens de satélite, em quaisquer das épocas de avaliação. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhao et al. (2007), ao compararem as relações obtidas para o IAF e a produção da fitomassa do algodoeiro, utilizando tanto dados de faixa estreita (espectrorradiometria de campo), quanto de faixa larga (imagens de satélite) na obtenção dos índices de vegetação. Eles observaram que os IVs apresentaram desempenho semelhante tanto para espectrorradiometria de campo como para dados obtidos de satélites, na predição dessas variáveis biofísicas, e que os IVs obtidos por espectrorradiometria se desempenharam melhor na predição do IAF nos estádios fenológicos iniciais. Esses autores também constataram que a produtividade estimada depende tanto dos índices de vegetação, quanto com a época de avaliação, concluindo que a melhor época para estimativa da produtividade é o estágio de pleno florescimento do algodoeiro e que para melhor acurácia do IAF e da produção da fitomassa como preditores da produtividade é necessário uma transformação não linear sobre essas variáveis.

5. Conclusões

A adubação teve influência significativa sobre a produtividade do algodoeiro irrigado. As leituras obtidas com o clorofilômetro portátil SPAD-502 possibilitaram a obtenção de modelos matemáticos para a predição do teor foliar de N no algodoeiro de maneira simples e com elevada precisão. A estimativa dos teores foliares deste nutriente pode ser feita a qualquer tempo entre os 40 dias após a emergência e o período de máximo florescimento, possibilitando a intervenção com adubação nitrogenada em cobertura antes que os sintomas visuais de deficiências estejam visíveis e haja comprometimento da produtividade.

Foi possível estimar variáveis biofísicas e a produtividade a partir da análise espectrorradiométrica com dados de campo. Com essa técnica foi possível a obtenção de modelos matemáticos precisos para todos os índices de vegetação. Os IVs aumentaram em resposta à adubação nitrogenada acompanhando o crescimento da cultura, sendo que o RDVI e o MSAVI apresentaram melhor desempenho aos 60 dias após a emergência, enquanto no estágio de pleno florescimento o MTVI2 foi o índice de vegetação de melhor ajuste. Com relação à avaliação da cultura em resposta a adubação fosfatada, o melhor ajuste foi obtido com o RDVI aos 80 dias após a emergência, que foi a melhor época da avaliação espectrorradiométrica para o P.

Os dados multiespectrais obtidos do satélite Landsat 5 possibilitam a obtenção de índices de vegetação (IVs_{sat}) com elevado grau de precisão. Os IVs aumentam em resposta a fertilização, indicando que esse método é adequado à estimativa do índice de área foliar desde o início da floração até o pleno florescimento. O MSAVI e o MTVI2 obtidos através de imagens de satélite se apresentaram como os melhores índices para predição do IAF em estádios fenológicos menos avançados, enquanto que o NDVI e o TVI apresentaram melhor desempenho no estágio de pleno florescimento, tendo sido essa época a melhor para estimativa do índice de área foliar por esse método.

Na determinação das equações preditivas a partir de dados de espectrorradiometria de campo, todos os IVs apresentaram altas correlações com o IAF. O TVI e o NDVI apresentaram os melhores coeficientes de determinação aos 60 DAE, enquanto o NDVI apresentou melhor ajuste na época de pleno florescimento, confirmando seu potencial como bom estimador das condições gerais da cultura e da densidade da cobertura vegetada. A produção de fitomassa pode ser estimada com dados de espectrorradiometria de campo através do NDVI, do SAVI ou do TVI que apresentaram bom desempenho aos 60 e 80 dias após a emergência, sendo que o NDVI pode ser usado como o melhor preditor nesses estádios fenológicos. A melhor época para predição da fitomassa do algodoeiro foi durante o estágio de pleno florescimento. Após o florescimento pleno, a redução do índice de área foliar, bem como a contribuição dos frutos na fitomassa total, não permitiu boa estimativa para a produção da fitomassa com dados de espectrorradiometria.

As equações preditivas obtidas através de dados multiespectrais do TM Landsat 5 apresentaram boa precisão para determinação do IAF em todas as épocas de avaliação, onde o NDVI apresentou melhor desempenho na época de maior cobertura foliar, sendo essa a melhor

época de avaliação. As equações preditivas para a produção de fitomassa aos 34 dias após a emergência não se mostraram adequadas, tendo apresentado bom desempenho para todos os IVs obtidos por satélite a partir dos 50 dias após a emergência, que foi a melhor época para obtenção das equações para estimativa dessa, onde o NDVI foi o índice que mostrou melhor desempenho para esse fim.

A produção de fitomassa através de imagens de satélite pode também ser estimada através da fração evaporativa usando o modelo de Monteith, especialmente se realizada entre o início e o pleno florescimento do algodoeiro, sendo essa última época considerada a mais apropriada e o NDVI e o TVI apresentando os melhores desempenhos.

Na análise das metodologias estudadas foi observado que os índices de vegetação obtidos através das imagens de satélite apresentaram desempenho similar àqueles obtidos por espectrorradiometria de campo na predição da produção de fitomassa do algodoeiro, tendo esse último método a vantagem de poder executar a avaliação a qualquer época e também ser seletivo, oferecendo melhor precisão para áreas menores. Adicionalmente, foi observado que os IVs obtidos através do espectrorradiômetro portátil apresentaram melhores correlações para predição do IAF do que aqueles índices obtidos através das imagens de satélite, em quaisquer das épocas de avaliação.

6. Referências Bibliográficas

- ALLEN, G. R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (Metric-Model). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.
- ALLEN, R., BASTIAANSEN, W., WATERS, R., TASUMI, M., TREZZA, R. Surface Energy Balance Algorithms for Land. **Advanced Training and Users Manual**, Idaho, 2002.
- ANGHINONI, I. Adubação nitrogenada nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M. B. (Ed.). **Adubação Nitrogenada no Brasil**, Ilhéus: CEPLAC/SBCS, p.1-18, 1985.
- ARGENTA, G., SILVA, P. R. F. da, BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, v.31, n.4, p.715-722, 2001.
- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F., HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v.13, p.95-120, 1995.
- BARET, F., GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, p.161-173, 1991.
- BARET, F., GUYOT, G., MAJOR, D. J. **TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation**. In: Proceedings of EGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canadá, 1989. p. 1355-1358.
- BARNES, J. D., BALAGUER, M.J.NARIQUE, L. E., ELVIRA, S., DAVISON, A. W. A reappraisal for the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. **Environment Exp. Botany**, v.32, p.85-100, 1992.
- BASTIAANSEN, W. G. M., ALI, S., A New Crop Yield Forecasting Model Based on Satellite Measurements Applied Across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**. v. 229, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**. v. 213, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain – A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean Climates**. Thesis, Landbouuniversiteit Wageningen, Netherlands, 273. 1995.
- BERG, M. J.; TYMOCZKO, J. L.; STRYER, L. **Transducing and storing energy. The light reactions of photosynthesis**. In: Biochemistry. Freeman, W. H. and company (ed.). 2002. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/>
- BRADFORD, J. B., HICKE, J. A., LAUENROTH, W. K. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 246-255, 2005.
- BRAGA, J.N.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. **Revista CERES**, Viçosa, v.21, n.113, p.73-85, 1974.
- BRANDÃO, Z. N., BEZERRA M. V. C., FREIRE E. C., DA SILVA B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P., BELTRÃO, N. E. M. **O Agronegócio do Algodão no Brasil**. Cap. 20. v.2. Ed: Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, DF. 2008. 1309 p.

- BRANDÃO, Z. N., BEZERRA, M. V. C., SILVA, B. B. **Estimativa da biomassa usando imagens de satélite**. Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2006. João Pessoa, PB. Brasil.
- BRANDÃO, Z. N., BEZERRA, M. V. C., FREIRE, E. C., SILVA, B. B. **Determinação de índices de vegetação usando imagens de satélite para agricultura de precisão**. Anais do V Congresso Brasileiro do Algodão, 2005. Salvador, BA. Brasil
- BOGGS, J. I., TSEGAYE, T. D., COLEMAN, T. I., REDDY, K. C., FAHSI, A. Relationship Between Hyperspectral Reflectance, Soil Nitrate-Nitrogen, Cotton Leaf Chlorophyll, and Cotton Yield: A Step Toward Precision Agriculture. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.22, p.05-16, 2003
- BROGE, N. H., LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**. v.76, p.156-172, 2001.
- BRONSON, K. F., MALAPATI, A., NUSZ, J. W. **Canopy spectral reflectance can guide in-season nitrogen fertilization of irrigated cotton**. Anais do The World Cotton Research Conference-4, WCRC-4. 2007. Lubbock, Texas. USA.
- BRONSON, K. F., BOOKER, J. D., KEELING, J. W., BOMAN, R. K., WHEELER, T. A., LASCANO, R. J., NICHOLS, R. L. Cotton canopy reflectance at landscape scale as affected by nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**. v. 97, p. 654-660, 2005.
- BUCKLAND, S. M.; PRICE, A. H.; HENDRY, G.A.F. The role of ascorbate in drought-treated *Cochlearia atlantica* Poved. and *Armeria maritime* (Mill.) Willd. **New Phytologist**, v. 119, p. 155-160. 1991.
- BUSCAGLIA, H. J., VARCO, J. J. Early detection of cotton leaf nitrogen status using leaf reflectance. **Journal of Plant Nutrition**. v. 25, p. 2067-2080, 2002.
- CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**, 2 ed, New York-London, The Guilford Press, 1996. 622p.
- CARTER. G.A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stresses. **American Journal of Botany** v. 80, p. 239-243. 1993.
- CARVALHO, M. C. S, FERREIRA, G. B., CARVALHO, O. S., SILVA, O. R. R. F., MEDEIROS, J. C. Nutrição, calagem e adubação. In: BELTRÃO, N. E. M., AZEVEDO, D. M. P. (Eds.) **O Agronegócio do Algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. Cap. 22, v. 2. 1309 p.
- CARVALHO, M. C. S., FERREIRA, G. B., STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: Freire, E. C. (Org.) **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília, DF: Associação Brasileira dos produtores de Algodão, 2007. Cap. 16. p. 581-647.
- CARVALHO, M. C. S, FERREIRA, G. B. **Calagem e adubação do algodoeiro no Cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 16 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 92).
- CASSMAN, K. G. Cotton. In: BENNET, W., ed. **Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants**. St. Paul, Ed. APS Press, p. 111-119. 1993.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing**. v. 41. n. 11. p. 2674-2677. 2003.
- CHAPPELLE, E. W., KIM, M. S., McMURTRY, J. E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environ**. v. 39, p. 239-247. 1992.
- CHOUDHURY, B. J. Relationships between vegetations indices, radiation absorptions and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. **Remote Sensing of Environment**. v. 22. p. 209-233. 1987.

- CHRISTENSEN, S., GOUDRIAAN, J. Deriving light interception biomass from spectral reflectance ratio. **Remote Sensing of Environment**, v.43, p.87–95, 1993.
- CLEVERS, J. G. P. W. A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.221–228, 1997.
- COONROD, J., McDONNELL L. Using remote sensing and GIS to compute evapotranspiration in the Rio Grande bosque. ESRI User Conference Proceedings. 2001. San Diego, CA.
- CRC – Cotton Catchment Communities. **Revista Nutrilogic**. In: Farm Series, CSIRO, Austrália, 2008.
- CURRAN. P. J., DUNGAN, J. L., MACLER, B.A., PLUMMER, S. E. The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. **Remote Sensing of Environment**. v. 35, p. 69-76, 1991.
- D'AGNESE, F. A., FAUNT, C.C., TURNER, A. K. **Using remote sensing and GIS techniques to estimate discharge and recharge fluxes for the Death Valley regional groundwater flow system, USA**. HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Proceedings of the Vienna Conference)). IAHS Publ. n. 235, p. 503-511, 1996.
- DAUGHTRY, C. S. T., WALTHALL, C. L., KIM, M. S., DE COLSTOUN, E. B., MCMURTREY III, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.74, p.229–239, 2000.
- DAUGHTRY, C. S. T., GALLO, K. P., GOWARD, S. N., PRINCE, S. D., KUSTAS, W. D. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing Environment**, v.39, p.141–152, 1992.
- DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a SECA. Comunicado em 25/01/2008. In: http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/php/comunicacao/noticias.php?f_registro=1248&f_opcao=imprimir&p_view=short&f_header=1&. Acesso em 19/09/2008.
- DYE, D. G., GOWARD, S. N. Photosynthetically active radiation absorbed by global land vegetation in august 1984. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.3361–3364, 1993.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Tecnologia e Informática Agropecuária. Base de dados de sistemas de produção. Sistema de produção. Embrapa Algodão. Versão Eletrônica, 2008. In:
http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoAgriculturaFamiliar_2_ed/cultivares.html. Acesso: 16/04/2008.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS. Nomes de alguns solos mais conhecidos no Antigo Sistema e seus prováveis correspondentes no Novo Sistema. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/sibcs/perq/perq02.html>>. Acessado em: 28/09/2009.
- EVERITT, J. H.; RICHARDSON, A.; GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance-nitrogen-chlorophyll relations in buffelgrass. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.51, p.463-466, 1985.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.74–88, 1995.

- FILELLA, L., PEÑUELAS, J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, p.1459-1470, 1994.
- FREIRE, E. C. (Ed.) **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, 2007. 918 p.
- FRIDGEN, L. J., VARCO, J. J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. **Agronomy Journal**, v. 96. p.63-69, 2004.
- GAMON, J. A., PEÑUELAS, J., FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v.41, p.35-44, 1992.
- GAUSMAN, H. W. Visible light reflectance, transmittance, and absorption of differently pigmented cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.13, p.233-238, 1982.
- GRANT, C. A., FLATEN, D. N., TOMASIEWICZ, D. J., SHEPPARD, S. C. Importance of Early Season Phosphorus Nutrition. **Better Crop**, vol. 85, n. 2, 2001.
- GERIK, T. J., OOSTERHUIS, D. M., TORBERT, H. A. Managing cotton nitrogen supply. **Advances in Agronomy**, v.64, p.115-147, 1998.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 1- 212, 1988.
- GOWARD, S. N.; HUENNRICH, K. F. Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v.39, p. 119-140, 1992.
- GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J., NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v.70, p.29-51, 1999.
- GOUDRIAAN, J. **Crop Micrometeorology: A Simulation Study**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation PUDOC, Wageningen, The Netherlands. 249 p,1977.
- GRIMES, D.W.; EL-ZIK, K.M. Cotton. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison, p. 741-771, 1990.
- GRIMES, D. W.; CARTER, L. M. A linear rule for direct nondestructive leaf area measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 3, n. 61, p. 477-479, 1969.
- GUPTA, R. K. Comparative study of AVHRR ratio vegetation index and normalized difference vegetation index in district level agricultural monitoring. **International Journal Remote Sensing**, v.14, p. 53-73,1993.
- HABOUDANE, D., MILLER, J. R., PATTEY E., ZARCO-TEJADA P. J., STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.337-352, 2004.
- HABOUDANE D., MILLER J. R., TREMBLAY N., ZARCO-TEJADA, P. J., DEXTRAZE, I, Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.416- 426, 2002.
- HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**, v. 57, p. 1332-1334, 1979.
- HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensing data. In: Swain, P. H., Davis, S. M. (eds), **Remote Sensing: The Quantitative Approach**, chapter 5, New York, USA, McGraw-Hill. 1978.
- HUETE, A. R., LIU, H. Q., BATCHILY, K., VAN LEEUWEN, W. "A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS", **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451. 1997.

- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
- HUETE, A. R., JACKSON, R. D. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. **Remote Sensing of the Environment**. v. 23, p. 213-232. 1987.
- HUTMACHER, R. B., TRAVIS, R. L., RAINS, D. W., VARGAS, R. N., ROBERTS, B. A., WEIR, B. L., Wridht, S.D., MUNK, D. S., MMARSH, B. H., KEELEY, M. P., FRITSCHI, F. B., MUNIER, D. J., NICHOLS, R. L., DELGADO, R. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin valley of California. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 48-62, 2004.
- INSKEEP, W.P.; BLOOM, P.R. Extinction coefficients of chlorophyll a and b in N,N-dimethylformamide and 80% acetone. **Plant Physiology**, v.77, p. 483-485, 1985.
- JACQUEMOUD, S., BACOUR, C., POILVE, H., FRANGI, J. P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode. **Remote Sensing of Environment**, v.74, p.417-481. 2000.
- JACQUEMOUD, S., BARET, F. Prospect: A model for leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**. v. 34, p. 75-91, 1990.
- JONES Jr, J. B; WOLF, B.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide**. Athens/Georgia-USA, 1991. 213 p.
- JOEL, G.; GAMON, J. A., FIELD, C. B. Production efficiency in sunflower: the role of water and nitrogen stress. **Remote Sensing of Environment**, v.62, p.176-188. 1997.
- KAUFMAN, Y. J., TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing**, v.30, p.261- 270, 1992.
- KNYAZIKHIN, Y., MARTONCHIK, J. V., MYNENI, R. B., DINER, D. J., RUNNING, S. W. "Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data", **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, pp. 32257-32276, 1998.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928
- KO, J., MAAS, S. J., MAUGET, S., PICCINNI, G., WANJURA, D. Modeling water-stressed cotton growth using within-season remote sensing data. **Agronomy Journal**, v.98, p. 1600-1609, 2006.
- KRAUSE, G. H.; WINTER, K. Photoinhibition of photosynthesis in plants growing in natural tropical forest gaps: a chlorophyll fluorescence study. **Botanics Acta**, v.109, n. 6, p. 456-462, 1996.
- KUMAR, L., SCHMIDT, K. S., DURY, S., SKIDMORE, A. K. **Imaging spectrometry and vegetation science**. In: VAN Der MEER, F., De JONG, S.M. (Eds.), *Imaging Spectrometry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 111-155, 2001.
- LACA-BUENDIA, J. P. C., PURCINO, A. A. C. Algodão: técnicas culturais. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v.6, n.68. 1980. 36p.
- LEE, D.W. Simulating forest shade to study the development ecology of tropical plants: Juvenile growth in three vines in India. **Journal of Tropical Ecology**, v. 4, p.281-292. 1988.
- LI, H., LASCANO, R. J., BARNES, E. M., BOOKER, J., WILSON, L. T., BRONSON, K. F., SEGARRA, E. Multispectral reflectance of cotton related to plant growth, soil water, texture, and site elevation. **Agronomy Journal**. v.93, p.1327-1337, 2001.
- LIANG, S. **Quantitative remote sensing of land surfaces**, ed. Wiley Interscience, New Jersey, USA, 2004. 534p.
- LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v. 11, p. 591-592, 1983.

- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. **Remote Sensing and image interpretation**. New York. Ed. John Wiley & Sons, INC. 1987. 721p.
- LIU, Z-Y., HUANG, J-F., WU, X-H., DONG, Y-P. Comparison of vegetation indices and red-edge parameters for estimating grassland cover from canopy reflectance data. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.49. p. 299-306, 2007.
- LUZ, M. J. da S.; BEZERRA, J. R. C.; FERREIRA, G. B.; SANTANA, J. C. F. de; DIAS, J. M.; SANTOS, J. W. dos. **Efeito de diferentes épocas de supressão da irrigação no rendimento e qualidade da fibra do algodão**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2002, 21p. (Embrapa Algodão, Boletim de Pesquisa, 52).
- MAJOR, D. J., BARET, F., GUYOT, G. A ration vegetation index adjusted for soil brightness. *Int. J. Remote Sensing of Environment*, v.11, p.727-740, 1990.
- MALAVOLTA, E., NOGUEIRA, N.G.L., HEINRICHS, R., HIGASHI, E.N., RODRIGUEZ, V., GUERRA, E., OLIVEIRA, S.C., CABRAL, C.P. Evaluation of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 35, p.1007-1019, 2004.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., DE OLIVEIRA, J. G. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e Aplicações**. POTAFOS, Piracicaba, 1989. 201p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de calagem e adubação das principais culturas**. São Paulo: Ceres, 1987. 496p.
- MALAVOLTA, E., HAAG, H. P., MELLO, F. A. F. de; BRASIL SOBRINHO, M. O. C. **Nutrição mineral de algumas culturas tropicais**. Piracicaba: Pioneira, 1967. p. 193-195.
- MARCUS-WYNER, L., RAINS, D.W. Nutritional disorders of cotton plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.13, p.685-736, 1982.
- MARKHAM, B. L., BAKER, J. L. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, **Exoatmospheric Reflectance and At-Satellite Temperatures**. EOSAT Landsat Tech, 1986.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 143-170.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. 2nd. ed. Londres: Academic Press, 1995. 889p.
- MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of cotton plant development. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v.5, p.313-317, 2001.
- MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.345, p.659-668, 2000.
- MARKWELL, J.; OSTERMAN, J.C.; MITCHELL, J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. **Photosynthesis Research**, v. 46, p. 467-472, 1995.
- McKINION, J.M., JENKINS, J.N., AKINS, D., TURNER, S.B., WILLERS, J.L., JALLAS, E., WHISLER, F.D. Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.32, p.213-218, 2001.
- MEDEIROS, C. J., JÚNIOR, M.C.J., PEREIRA, R.J., CARVALHO, S.C.M. **Resposta do algodoeiro a doses e fontes de nitrogênio no cerrado**. Comunicado técnico 216. Embrapa Algodão, 2004.
- MEDEIROS, J. da C.; SANTOS, J.W. dos; BEZERRA, J.R.C. Efeito de doses e fontes de nitrogênio sobre o algodão irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 1., 1997, Fortaleza. Algodão Irrigado. **Anais**. Campina Grande: EMBRAPA ALGODÃO, 1997. p.383-384.

- MEGOWN, R. A., WEBSTER, M., JACOBS, S. Using Landsat TM imagery to estimate LAI in a eucalyptus plantation. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, p. 819–838, 2004.
- MENDES, H.C. Nutrição do algodoeiro. I. Sintomas de deficiências minerais em plantas vegetando em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.18. p.467-481, 1959.
- MILTON, N. M., EISWERTH B. A., AGER, C. M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. *Remote Sensing of Environment*, v.36, p.121-127, 1991.
- MINOLTA CAMERA Co. Ltd., Chlorophyll meter SPAD-502. **Instruction Manual**. Radiometric Instruments Divisions, Osaka, Minolta, p. 22. 1989.
- MONJE, O. A.; BUGBEE, B. Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: A comparasion of two types of meteres. **Hotscience**, v.27, p. 69-71, 1992.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**. v.9, p. 747–766, 1972.
- MORAN, M. S., INOUE, Y., BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.319– 346, 1997.
- MORAN, M. S., MAAS, S. J., PINTER Jr., P. J. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. **Remote Sensing of Environment**. v.12, p. 335–353, 1995.
- MORAN, R. Formulae for determination of chlorophyllous pigments extracted with N,N-dimethylformamide. **Plant Physiology**, v. 69, p. 1376-1381, 1982.
- MORAN, R.; PORATH, D. Chlorophyll determinations in intact tissue using N,N-dimethylformamide. **Plant Physiology**, v. 65, p. 478-479, 1980.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.
- MOTOMIYA, A. V. de A., MOLIN, J. P., CHIAVEGATO, E.J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p.137-145, 2009.
- MOZAFFARI, M., OOSTERHUIS, D. M., MCCONNELL, J. S., SLATON, N. A., GONIAS, E. D., BIBI, A. C., EVANS, E. E., KENNEDY, C. **Effect of phosphorus fertilization on cotton yield and leaf reflectance in a representative silt loam** AAES Research Series 543. Summaries of Arkansas Cotton Research 2005, p 69-73.
- MYNENI, R. B., HOFFMAN, S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J. L., GLASSY, J., TIAN, Y., WANG, Y., SONG, X., ZHANG, Y., SMITH, G. R., LOTSCH, A., FRIEDL, M., MORISETTE, J. T., VOTAVA, P., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W. "Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data", **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 214– 231, 2002.
- MYNENI, R. B., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing** v.35. p. 1380-1393. 1997.
- NAMAYANGA L. N. 2002. **Estimating terrestrial carbon sequestered in aboveground woody biomass from remotely sensed data (The use of SEBAL and CASA algorithms in a semi-arid area of Serowe-Botswana)**. PhD Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. 64p.
- OOSTERHUIS, D. M. Physiology and nutrition of high yielding cotton in the USA. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 95, p. 18-24, 2001. (Encarte Técnico)

- OOSTERHUIS, D. M., BEDNARZ, C. W. Physiological changes during the development of potassium deficiency in cotton. In: ed. T. Ando et al., **Plant nutrition - for sustainable food production and environment**. Kluwer Academic Publishers, Japão. 1997. p.347-351.
- OSBORNE, S. L., SCHEPERS, J. S., FRANCIS, D. D., SCHLEMMER, M. R. Detection of Phosphorus and Nitrogen Deficiencies in Corn Using Spectral Radiance Measurements. **Agronomy Journal**, v.94, p.1215-1221, 2002.
- OVIEDO, A., HERZ, R., RUDORFF, B. F. T. Efeito do estresse hídrico e da densidade de plantio no uso da radiação e produtividade da cultura do trigo. **Revista Biociências**, v.7, n.1, p.23 – 33, 2001.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends Plant Science**, v.3, p.151-156, 1998.
- POTTER, C. S., RANDERSON, J. T., FIELD, C. B., MATSON, P. A., VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A., et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. **Global Biogeochemical Cycles**, v.7, p. 811– 841, 1993.
- QI, J., KERR, Y. H., MORAN, M. S., WELTZ, M., HUETE, A. R., SOROOSHIAN, S., BRYANT, R. Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. **Remote Sensing of Environment**, v.73, p.18–30, 2000.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KEER, Y. H., SOROOSHIAN, S. A modified soil vegetation adjusted index. **Remote Sensing of Environment**, v.48, p.119-126. 1994.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343p.
- RAO, T.P.; ITO, O.; MATSUNAGA, R.; YONEYAMA, T. Kinetics of ¹⁵N-labelled nitrate uptake by maize (*Zea mays* L.) root segments. **Soil Science of Plant Nutrition**, v.43, n.3, p.491-498, 1992.
- READ, J. J., REDDY, K. R., JENKINS, J. N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. **European Journal Agronomy**, v.24, p. 282-290. 2006.
- REDDY, K. R., ZHAO, D. Interactive effects of elevated CO₂ and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton. **Field Crops Research**, v.94, p.201-213, 2005.
- REDDY, K. R., KOTI, S., DAVIDONIS, G. H., REDDY, V. R. Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield, and fiber quality. **Agronomy Journal**. 96, 1148–1157. 2004.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Adsorção de nutrientes pelas plantas. In: **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Ed Manole, Barueri, SP. 2004. p. 341-355.
- ROCHESTER, I., CEENEY S., MAAS, S., GORDON, R., HANNA, L., HILL, J. **Monitoring nitrogen use efficiency in cotton crops**. Cotton Catchment Communities CRC. Disponível em: <http://www.crdc.com.au/uploaded/file/E-Library/Climate%20Change%20July%202009/Cotton%20NUE%20Monitoring%202008.pdf>. 2009.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M., BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.55, p.95-107, 1996.
- ROSOLEM C. A. Fenologia e ecofisiologia no manejo do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.) **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, 2007. 918p.
- ROSOLEM, C. A. Problemas em nutrição mineral, calagem e adubação do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, n.95, 2001. 17p. Encarte Técnico.
- ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro**, In: Congresso Internacional do Agronegócio do Algodão, Cuiabá. Anais. Cuiabá: Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, 2000. p. 203-211.

- ROSOLEM, C. A., BASTOS, G. B. Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC 22. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n.2, p. 377-387, 1997.
- ROUJEAN, J-L., BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.375– 384. 1995.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W., HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. **NASA/GSFC, Final Report**, Greenbelt, MD, 1974. 371 p.
- RUNYON, J., WARING, R. H., GOWARD, S. N., WELLES, J. M. Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. **Ecology Applied**. v. 4, p. 226-237. 1994.
- RUSSELL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSELL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P. G. (Ed.). **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press: 1989. p. 21-39. Society for Experimental Biology Seminar Series, 31. 1989.
- SALISBURY, F. B., ROSS, C. W. Plant physiology. 2nd ed. Wadsworth Publicher. Co., Belmont, CA. 1978.
- SCHRÖDER, J. J.; NEETESON, J. J.; OENEMA, O.; STRUIK, P. C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, v. 66, p.151-164, 2000.
- SCHREIBER, H. A., STANBERRY, C. O., TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects on sweet corn row number at various growth stages. **Science**, v. 135, n.1, p.135-136, 1988.
- SELLERS, P. J., DICKINSON, R. E., RANDALL, D. A., BETTS, A. K., HALL, F. G., BERRY, J. A., COLLATZ, G. J., DENNING, A. S., MOONEY, H. A., NOBRE, C. A., SATO, N., FIELD, C. B., HENDERSON-SELLERS, A. "Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere". **Science**, v. 275, pp. 502–509. 2007.
- SELLERS, P. J., LOS, S. O., TUCKER, C. J., JUSTICE, C. O., DAZLICH, D. A., COLLATZ, G. J., RANDALL, D. A. "A revised land surface Parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data", **Journal of Climate**, v. 9, pp. 706–737. 1996.
- SELLERS, P. J. "Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence", **Remote Sensing of Environment**, v. 21, pp. 143-183. 1987.
- SEMARH-RN – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Acesso em: 10.08.2008 – site: <http://www.semarnh.rn.gov.br/detalhe.asp?IdPublicacao=137>. 2008.
- SERRANO, L., FILELLA, L., PEÑUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**. v.40, p.723–731, 2000.
- SHARMA, T., SUDHA, K. S., RAVI, N., NAVALGUND, R. R., TOMAR, K. P., CHAKRAVARTY, N. V. K., DAS, D. K. Procedures for wheat yield prediction using Landsat MSS and IRS-1A data. **Int. Journal Remote Sensing**. v.14, p.2509–2518, 1993.
- SHOAF, T. W.; LIUM, B. W. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulphoxide. **Limnology and Oceanography**, v. 21, p. 926-928, 1976.
- SILVA, N. M. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: 1999. p. 57-92.
- SILVA, N. M.; RAIJ, B. van. Fibrosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação IAC, 1996. Cap. 24, p.261-273. (Boletim Técnico, 100).

- SILVA, N. M. da.; DUARTE, A. P.; RAIJ, B. van. Efeitos da potassagem e gessagem no algodoeiro. In: REUNIÃO NACIONAL DO ALGODÃO, 8. Londrina, 1995. **Resumos**. Londrina: IAPAR, 1995. p.116.
- SOUSA, D. M. G., LOBATO, E.; REEIN, T. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. Cap. 6, p.147-168.
- STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H. Calagem e Adubação. In: Embrapa Agropecuária Oeste/Embrapa algodão. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. p.103-123.
- STONE, M. L., SOLIE, J. B., RAUN, W. R., WHITNEY, R. W., TAYLOR S.L., RINGER J.D. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **Trans. ASAE**, v.39, p.1623-1631, 1997.
- TARPLEY, L., REDDY, K.R., SASSENATH-COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, v.40, p.1814-1819. 2000.
- THENKABAIL, P. S. Inter-sensor relationships between Ikonos and Landsat-7 ETM + NDVI data in three ecoregions of Africa. **Int. Journal Remote Sensing**, v.25, p.389-408. 2004.
- THENKABAIL, P. S., SMITH, B. B., PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v.71, p.158-182, 2000.
- THIELE, A.; KRAUSE, G. H.; WINTER, K. *In situ* study of photoinhibition of photosynthesis and xanthophylls cycle activity in plants growing in natural gaps of the tropical forest. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 25, p. 189-195, 1998.
- THOMAS, J. R., GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, v.69, p.799-802.1977.
- TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G.; SMITH, R.E.B. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 104 p. 199-209, 2005.
- TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G.; YAMANISHI, O. K. Portable chlorophyll meter for the quantification of photosynthetic pigments, nitrogen and the possible use for assessment of the photochemical process in *Carica papaya*. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 14, n. 3, p. 203-210, 2002.
- TREZZA, R. **Estimation of Crop Water Use from Satellite-Based Surface Energy Balance Models for Water Management in Irrigation Districts in Venezuela, South America**. Conferencia Internacional "Earth Observation for vegetation monitoring and water management". Universidad de Napoli, Italia, Noviembre 10-11, 2005.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, p.127- 150, 1979.
- WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G., SPELLMAN, D. E., SOLTANPOUR, P. N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.27, p. 545- 560, 1996.
- WEI-QUN, Q., WANG, S-H., CHEN, B-L., WANG, Y-H., ZHOU, Z-G. SPAD value of cotton leaves on main stem and nitrogen diagnoses for cotton growth. **Acta Agronomica Sinica**, v.33, n.6. p. 1010-1017, 2007.
- WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144, n.3, p.307-313, 1994.

- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J; ESCOBAR D.E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, p.105-109, 1991.
- WIEGAND, C. L., MASS, S. J., AASE, J. K., HATFIELD, J. L., PINTER, P. J., JR., JACKSON, R. D., KANEMASU, E. T., LAPITAN, R. L. Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, p.1-21. 1992.
- WOLF, F.T. Changes in chlorophylls a and b in autumn leaves. **American Journal of Botany**, v. 43, p. 714-718, 1956.
- YAMADA, T., MALAVOLTA, E., MARTINS, O. C., ZANCANARO, L., CASALE, H., BAPTISTA, I. **Teores foliares de nutrientes observados em areas de alta produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1999.
- YOUNG, A. L.; FRANK, H. A. Energy transfer reactions involving carotenoids: quenching of chlorophyll fluorescence. **J. Photoch. Photobiol. B: Biology**, v.36, n.1, p.3-15, 1996.
- ZARCO-TEJADA, P. J., USTIN, S. L., WHITING, M. L. Temporal and spatial relationship between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. **Agronomy Journal**. v.97, p.641-653, 2005.
- ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R., MORALES, S. L., BERJÓN A., AGÜERA, J. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.463-476, 2004.
- ZARCO-TEJADA, P. J., RUEDA, C. A., USTIN, S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing of Environment**, v.85, p.109-124, 2003.
- ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R., NOLAND, T. L., MOHAMMED, G. H., SAMPSON, P. H. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. **IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing**, v.39, p.1491-1507. 2001.
- ZHAO, D., HUANG, L., LI, J., QI, J. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 62. p. 25-33. 2007.
- ZHAO, H.D., LI, L. J, QI, G. J. Identification of red and NIR spectral regions and vegetative indices for discrimination of cotton nitrogen stress and growth stage. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.48, p.155-169, 2005.
- ZHAO, D., OOSTERHUIS, D.M. **Nitrogen application effect on leaf photosynthesis, nonstructural carbohydrate concentrations and yield of field-grown cotton**. In: OOSTERHUIS, D.M. (Ed.), Proceedings of the 2000 Arkansas Cotton Res., AAES Special Report 198, p. 69-71, 2000.
- ZHANG, Y., TIAN Y., KNYAZIKHIN Y., MARTONCHIK J. V., DINER D. J., LEROY M., MYNENI, R.B. Prototyping of MISR LAI and FPAR Algorithm with POLDER Data over Africa. **IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2402-2418, 2000.
- ZHENG, D., RADEMACHER, J., CHEN, J., CROW, T., BRESEE, M., LE MOINE, J., RYU, S-R. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. **Remote Sensing of Environment**, v.93, p.402- 411, 2004.

Apêndice A

Balanço de Energia e Fração Evaporativa

Os componentes do balanço de energia, juntamente com o modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) de Monteith (1972) e o modelo de eficiência da luz de Field et al. (1995), são a base para a determinação da fitomassa acumulada na superfície, como mostrado anteriormente no diagrama da Figura 5.

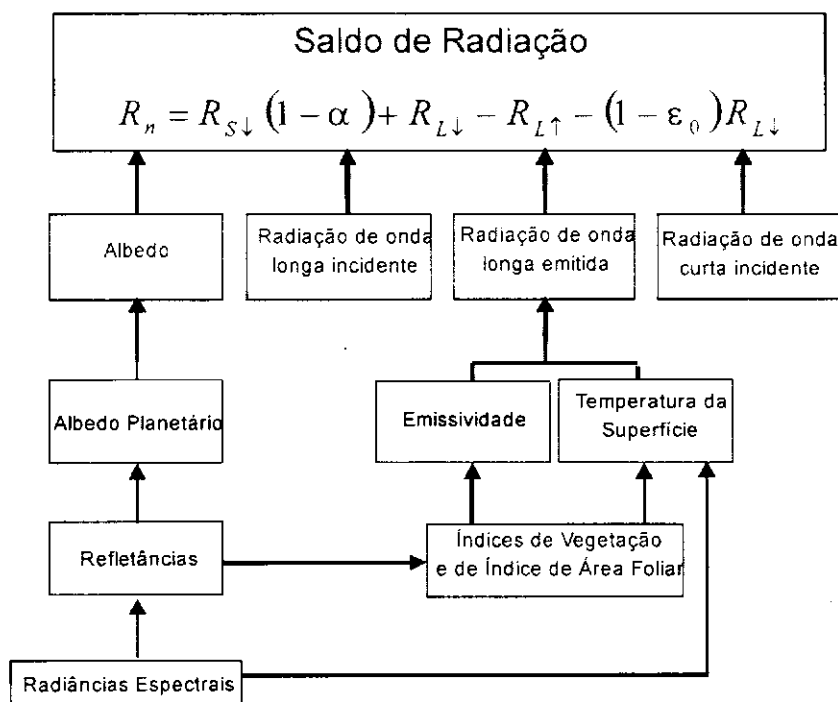


Figura 47. Diagrama representativo dos passos necessários para obtenção do saldo de radiação à superfície. Fonte: Allen et al., 2002.

Para determinação do saldo de radiação à superfície, R_n , representado na Figura 47, faz-se necessário a conversão da imagem, composta por números digitais, em radiâncias espectrais através da equação (CHANDER e MARKHAM, 2003):

$$L_{\lambda_i} = L_{i,\min} + \left(\frac{L_{i,\max} - L_{i,\min}}{255} \right) ND \quad (34)$$

onde L_i são as constantes de calibração para o Landsat (radiâncias espectrais mínima e máxima) ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), e tem seus valores fornecidos no arquivo cabeçalho que acompanha a imagem, ND é a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255) e $i = 1, 2, \dots, 7$, corresponde às bandas 1, 2, ..., 7, do TM Landsat 5.

Em seguida, os valores de radiância foram convertidos em reflectância planetária (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSEN, 1995):

$$R_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \times \cos\theta \times d_r} \quad (35)$$

onde R_{λ} é refletância planetária da banda i , $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera (Tabela 20), θ é o ângulo de incidência solar, calculado através do ângulo de elevação solar fornecido no arquivo cabeçalho, e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra – Sol – d_r , em unidades astronômicas, que é dada por :

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left[DOY \frac{2\pi}{365} \right] \quad (36)$$

onde DOY é o dia Juliano e o argumento da função cosseno está em radianos.

Tabela 20. Valores de $ESUN$ para o TM Landsat 5 fornecida em ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Landsat 5	1957	1829	1557	1047	219.3	-	74.52

Uma vez obtidas as cartas da refletância planetária de cada uma das bandas do TM - Landsat 5, obteve-se o *albedo do topo da atmosfera*, que é calculado por (Bastiaanssen, 1995):

$$\alpha_{toa} = \sum (\omega_{\lambda} \times R_{\lambda}) \quad (37)$$

onde: R_{λ} é a refletividade calculada anteriormente para cada banda e ω_{λ} é o coeficiente de peso que considera a fração de toda a energia solar potencial a superfície sobre uma faixa representada para cada banda (Tabela 21), dado por (ALLEN et al., 2002):

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (38)$$

Tabela 21. Coeficientes de peso para cada canal, ω_{λ}

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Landsat 5	0.293	0.274	0.233	0.157	0.033	-	0.011

Assim, o albedo de superfície é calculado fazendo-se a correção do albedo do topo da atmosfera com relação à transmissividade atmosférica, e é dado por (ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN, 1995):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (39)$$

sendo $\alpha_{path_radiance}$ a porção da radiação solar incidente refletida pela atmosfera (valor entre 0,025 e 0,04) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, que pode ser obtida segundo expressão proposta por Allen et al. (2002):

$$\tau_{sw} = 0.75 + (2 \times 10^{-5} \times z) \quad (40)$$

em que z representa a altitude local, dada para o campo experimental em Apodi como sendo 129 m.

Após a obtenção das refletâncias para cada canal, também é possível obter os índices de vegetação, fornecidos anteriormente pelas equações (1), (2), (3), (4), (5) e (7), bem como o índice de área foliar dado pela equação (34).

A emissividade termal é então dada em função do IAF (ALLEN et al., 2002):

$$\varepsilon_{NB} = 0.97 + (0.0033 \times IAF) \quad (41)$$

sendo essa expressão válida para o IAF < 3,0 e NDVI > 0. Para valores do IAF $\geq 3,0$, considerou-se $\varepsilon_{NB} = 0,98$ (ALLEN et al., 2002).

Já a emissividade em todo o domínio da radiação termal é dada por (ALLEN et al., 2002):

$$\varepsilon_0 = 0.95 + (0.01 \times IAF) \quad (42)$$

sendo essa expressão válida para o IAF < 3,0 e NDVI > 0. Para valores do IAF $\geq 3,0$, considerou-se $\varepsilon_0 = 0,98$. Os valores das emissividades para água (NDVI < 0 e $\alpha < 0,47$) são: $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$.

De posse do mapa de radiância espectral da banda termal (banda 6 do Landsat 5), obtida anteriormente, bem como da emissividade da banda termal, procedeu-se à determinação da *Temperatura da Superfície*, T_s (K) que foi feita segundo modelo proposto por Markham e Barker (1986), utilizado em vários estudos (ALLEN et al., 2002, BASTIAANSEN, 1995):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (43)$$

em que $K_1 = 607,76$ ($W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$) e $K_2 = 1260,56$ K são constantes de calibração da banda termal (MARKHAM e BARKER, 1986). O $L_{\lambda,6}$ é a radiância espectral da banda 6 já obtida anteriormente.

Com a temperatura de superfície, foi determinada a radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$), em $W m^{-2}$, obtida através da equação de Stefan-Boltzman (ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN, 1995):

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (44)$$

em que: ε_0 e T_s representam a emissividade e a temperatura de cada pixel, e σ é a constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^4$).

Por sua vez, a radiação solar incidente ($R_{S\downarrow}$) para céu claro é dada por (ALLEN et al., 2002):

$$R_{S\downarrow} = G_s \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (45)$$

sendo G_s a constante solar (1367 W m^{-2}) e τ_{sw} a transmissividade atmosférica, dada por:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp\left[\frac{-0,00146P}{k_t}\right] - 0,075\left(\frac{W}{\cos z}\right)^{0,4} \quad (46)$$

Já a radiação termal emitida pela atmosfera ($R_{L\downarrow}$) foi obtida por (ALLEN et al., 2002):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (47)$$

onde T_{ar} é a temperatura do ar (K) e ε_{atm} é a emissividade atmosférica, dada por:

$$\varepsilon_{atm} = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{atm})^{0,09} \quad (48)$$

Assim, balanço de radiação à superfície é dado por:

$$R_n = R_{s\downarrow}(1-\alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (49)$$

onde: $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente (W m^{-2}), α é o albedo da superfície (adimensional), $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida (W m^{-2}), $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente (W m^{-2}), e ε_0 é a emissividade termal da superfície (adimensional).

O Fluxo de Calor no Solo, G (W m^{-2}) é a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação devido a condução. No SEBAL, usa-se a seguinte equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), representando valores próximos ao meio-dia:

$$G = \left[T_s / \alpha \cdot (0,0038 \cdot \alpha + 0,0074 \cdot \alpha^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (50)$$

O Fluxo de Calor no Sensível, H (W m^{-2}) é a taxa de armazenamento de calor transferido da superfície para o ar através dos processos de convecção ou condução. O mesmo pode ser calculado utilizando-se a equação do transporte de calor, que é dada por:

$$H = \rho \cdot c_p \cdot dT / r_{ah} \quad (51)$$

onde ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}),

c_p é o calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \cdot \text{K}$),

dT (K) é a diferença de temperatura entre a superfície e um nível de referência e

r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (seg m^{-1}).

O fluxo de calor sensível é uma função do gradiente de temperatura, rugosidade da superfície e velocidade do vento. Para a sua obtenção com o SEBAL, faz-se necessário o conhecimento da velocidade do vento (e do nível de altura de sua obtenção) e componentes R_n e G em dois pixels *âncoras* para se determinar a variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}).

Para o cálculo da velocidade de fricção (u^*) usa-se o perfil logaritmo do vento para a condição de atmosfera neutra dada como sendo (ALLEN et al., 2002):

$$u^* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (52)$$

em que: k é constante de von Karman,

u_x é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) na altura z_x , e

z_{0m} é o coeficiente de rugosidade (m),

O coeficiente de rugosidade foi estimado através da altura média da vegetação usando a seguinte equação de Brutsaert (1982) (ALLEN et al., 2002):

$$z_{0m} = 0,12h \quad (53)$$

onde h é a altura média da vegetação.

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor é dada pela equação que segue, estando de posse do valor de u^* , pixel a pixel e admitindo condições de estabilidade neutra para a atmosfera.

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2 / z_1)}{u^* \cdot k} \quad (54)$$

onde z_1 e z_2 são as alturas, em metros, acima do dossel da cultura e k é a constante de Von Karman.

Considerando que a altura z_2 pode ser dada pela altura padrão de medição da velocidade do vento nas estações meteorológicas, ou seja, $z_2 = 2m$, e z_1 seja a altura imediatamente superior à superfície do solo, ou seja, $z_1 = 0,1m$ (ou 10 cm).

Assim, tem-se a resistência aerodinâmica em cada pixel da imagem, dada por:

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2 / z_1)}{u^* \cdot k} \quad (55)$$

O fluxo de calor sensível H em todos os pixels da imagem pode ser obtido pela Equação (51), onde é necessário saber a diferença de temperatura ΔT ($^{\circ}C$), para cada pixel, obtida por (ALLEN et al., 2007):

$$\Delta T = a + bT_{sd} \quad (56)$$

onde a e b são coeficientes da relação obtidos através dos pixels "âncoras" (pixel frio e quente) e T_{sd} foi obtida por:

$$T_{sd} = T_s + 0,0065\Delta z \quad (57)$$

em que Δz é a diferença entre a elevação de cada pixel e a elevação média da cena.

O pixel frio é obtido de uma área bem irrigada, onde foi assumido que:

$$H_{frio} = R_n - G - \lambda ET_{frio} = 0 \quad (58)$$

Por outro lado, considera-se o pixel quente numa área de solo exposto, onde admite-se $\lambda ET_{quente} = 0$, assim, no pixel "quente", o fluxo de calor sensível é dado por:

$$H_{quente} = R_n - G \quad (59)$$

Uma vez conhecido em cada pixel o valor do fluxo de calor sensível (H), que como visto foi obtido supondo-se atmosfera em equilíbrio neutro, o que não corresponde à realidade, determina-se agora o H corrigido. Para tanto, considera-se a teoria de similaridade de Monin-Obukhov, com o que são processadas as correções devido à turbulência térmica sobre cada pixel.

O comprimento de Monin-Obukhov (L) é utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera. Este comprimento é uma função dos fluxos de calor e de momentum, sendo computado como:

$$L = -\frac{\rho \cdot c_p \cdot (u^*)^3 \cdot T_s}{k \cdot g \cdot H} \quad (60)$$

onde: ρ é a densidade do ar ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1.004 \text{ J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

u^* é a velocidade de fricção (m s^{-1}),

T_s é a temperatura da superfície (K),

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) e

H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

Os valores de L definem as condições de estabilidade, da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável; e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum, (ψ_m) e de calor, (ψ_h) deverão ser considerados (ALLEN et al., 2002).

Para a **condição de instabilidade**: $L < 0$, tem-se:

$$\psi_{m,100} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + X_{100}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + X_{100}^2}{2}\right) - 2 \cdot \text{tg}^{-1}(X_{100}) + 0,5\pi \quad (61)$$

$$\psi_{h,2m} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + X_{2m}^2}{2}\right)$$

$$\psi_{h,0,1m} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + X_{0,1m}^2}{2}\right)$$

onde X_{im} é calculado segundo:

$$X_{im} = \left(1 - 16 \frac{i}{L}\right)^{0,25} \quad (62)$$

Já a correção ao transporte de calor sensível (ψ_h) em condição **de equilíbrio estável**, é obtida segundo expressão:

$$\psi_{m,100} = -5 \cdot \left(\frac{100}{L}\right) \quad (63)$$

E a correção ao transporte de calor sensível será então:

$$\psi_{h,2m} = -5 \cdot \left(\frac{2}{L}\right)$$

Em que tem-se para 0,1 metro:

$$\psi_{h,0,1m} = -5 \cdot \left(\frac{0,1}{L}\right)$$

Para **condição de neutralidade** ($L = 0$), $\psi_m = \psi_h = 0$.

Nesse caso, tem-se que recalcular o valor corrigido de H e para isso é preciso da velocidade de fricção corrigida que é agora calculada em cada etapa sucessiva, segundo a equação:

$$u^* = \frac{u_{100} k}{\ln\left(\frac{100}{Z_{om}}\right) - \psi_{m,100m}} \quad (64)$$

Assim, a resistência aerodinâmica corrigida aos efeitos de turbulência de origem térmica, será dada por:

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_{0,1})}}{k \times u^*} \quad (65)$$

Após o cálculo da resistência aerodinâmica e do H pode-se então obter o Fluxo de Calor Latente λE ($W m^{-2}$) segundo (ALLEN et al., 2002):

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (66)$$

Finalmente, pode-se calcular a fração evaporativa. Ela instantânea foi considerada por alguns autores como similar a de 24h, e é usada para calcular a evaporação real de 24h dos fluxos instantâneos do calor latente. Ela é dada por (BRADFORD, 2005):

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{(R_n - G)} \quad (67)$$

Com a estimativa da fração evaporativa, Λ , é possível a determinação do fator de eficiência do uso da luz, ε , de Field et al. (1995), através da Equação (28) e a fitomassa acumulada, através da Equação (30), vistas anteriormente.

Apêndice B

Dados para Irrigação

Tabela 22 Programação de irrigação do algodoeiro em Apodi, RN, safra 2008/2009

DATA	Dia Juliano	Eto (mm)	Eto do Período (mm)	Kc	Lâmina Líquida (mm)	Lâmina Bruta (mm)	Tempo de Irrigação (h)	Tempo de Irrigação semanal (h:min)
23/09/08	267				40,56			
24/09/08	268	7,78						
25/09/08	269	8,16						
26/09/08	270	8,98						
27/09/08	271	8,32						
28/09/08	272	8,19						
29/09/08	273	9,00						
30/09/08	274	7,12	57,57	0,52	29,93	39,91	3,99	3:59:00
01/10/08	275	7,71						
02/10/08	276	5,15						
03/10/08	277	7,19						
04/10/08	278	8,31						
05/10/08	279	7,81						
06/10/08	280	7,63						
07/10/08	281	8,02	51,83	0,52	26,95	35,93	3,59	3:35:00
08/10/08	282	7,60						
09/10/08	283	7,60						
10/10/08	284	8,45						
11/10/08	285	8,81						
12/10/08	286	8,55						
13/10/08	287	7,36						
14/10/08	288	8,68	57,06	0,55	31,38	41,84	4,18	4:10:00
15/10/08	289	7,39						
16/10/08	290	7,95						
17/10/08	291	7,23						
18/10/08	292	7,24						
19/10/08	293	7,34						
20/10/08	294	7,27						
21/10/08	295	7,88	52,30	0,65	33,99	45,33	4,53	4:32:00
22/10/08	296	8,31						
23/10/08	297	8,84						
24/10/08	298	8,35						
25/10/08	299	8,11						
26/10/08	300	8,75						
27/10/08	301	8,69						
28/10/08	302	8,76	59,81	0,74	44,26	59,01	5,90	5:54:00
29/10/08	303	8,30						
30/10/08	304	7,75						
31/10/08	305	8,42						
01/11/08	306	8,01						
02/11/08	307	8,00						
03/11/08	308	7,77						
04/11/08	309	7,89	56,14	0,83	46,60	62,13	6,21	6:12:00
05/11/08	310	8,15						
06/11/08	311	8,60						
07/11/08	312	7,90						
08/11/08	313	7,76						
09/11/08	314	7,64						
10/11/08	315	7,66						
11/11/08	316	7,48	55,19	0,92	50,77	67,69	6,77	6:46:00

Tabela 22 Programação de irrigação do algodoeiro em Apodi, RN, safra 2008/2009 - continuação

DATA	Dia Juliano	Eto (mm)	Eto do Período (mm)	Kc	Lâmina Líquida (mm)	Lâmina Bruta (mm)	Tempo de Irrigação (h)	Tempo de Irrigação semanal (h:min)
12/11/08	317	8,11						
13/11/08	318	6,28						
14/11/08	319	7,60						
15/11/08	320	8,06						
16/11/08	321	7,72						
17/11/08	322	7,72						
18/11/08	323	7,61	53,31	1,01	53,69	71,59	7,16	7:10:00
19/11/08	324	8,33						
20/11/08	325	8,25						
21/11/08	326	8,04						
22/11/08	327	8,58						
23/11/08	328	8,22						
24/11/08	329	8,31						
25/11/08	330	8,12	57,85	1,05	60,74	80,99	8,10	8:06:00
26/11/08	331	8,52						
27/11/08	332	8,01						
28/11/08	333	7,47						
29/11/08	334	7,59						
30/11/08	335	7,48						
01/12/08	336	6,78						
02/12/08	337	6,61	52,45	1,05	55,07	73,43	7,34	7:20:00
03/12/08	338	5,72						
04/12/08	339	6,72						
05/12/08	340	8,02						
06/12/08	341	8,24						
07/12/08	342	7,70						
08/12/08	343	8,15						
09/12/08	344	7,26	51,81	1,05	54,40	72,53	7,25	7:15:00
10/12/08	345	7,28						
11/12/08	346	7,69						
12/12/08	347	8,14						
13/12/08	348	7,91						
13/12/08	348	7,91						
15/12/08	350	7,03						
16/12/08	351	6,96	52,93	1,05	55,57	74,10	7,41	7:24:00
17/12/08	352	8,28						
18/12/08	353	8,05						
19/12/08	354	7,89						
20/12/08	355	6,47						
21/12/08	356	7,36						
22/12/08	357	7,36						
23/12/08	358	7,66	53,08	1,05	55,73	74,31	7,43	7:25:00
17/12/08	352	8,28						
18/12/08	353	8,05						
19/12/08	354	7,89						
20/12/08	355	6,47						
21/12/08	356	7,36						
22/12/08	357	7,36						
23/12/08	358	7,66	53,08	0,87	46,18	61,57	6,16	6:10:00
Total			764,38		645,27			

Tabela 23. Dados obtidos em campo e cálculo da Eto para o algodoeiro irrigado safra 2008/2009 em Apodi, RN

	DJ	dr	d	Ang. Solar	Ra	Rs	Rns	Tmin	Tmax	Tm	Tx	Rso	e _a T _m	e _a T _x	UR _x	UR _m	URxc or (+1)	URmc or (-1)	e _s	e _a (real)	R _n L	R _n	T _{ar}	D	vento	ETo
								°C	°C	°C	°C		Kpa	Kpa	%	%	%	%	KPa				°C		m/s	mm/dia
4/out	278	1,002	-0,103	1,581	37,9	26,3	20,3	23,9	36,8	23,6	37,1	28,5	2,9	6,3	82,0	26,0	83,0	25,0	4,6	2,0	5,3	15,0	30,4	0,2	3,0	8,0
5/out	279	1,003	-0,110	1,582	37,9	29,4	22,6	23,4	35,8	23,1	36,1	28,6	2,8	6,0	74,0	25,0	75,0	24,0	4,4	1,8	6,6	16,1	29,6	0,2	3,1	8,4
6/out	280	1,004	-0,116	1,582	38,0	35,0	27,0	21,8	36,0	21,5	36,3	28,6	2,6	6,0	75,0	23,0	76,0	22,0	4,3	1,7	8,5	18,4	28,9	0,2	2,9	8,9
7/out	281	1,004	-0,123	1,583	38,0	31,6	24,3	22,7	35,4	22,4	35,7	28,6	2,7	5,8	73,0	22,0	74,0	21,0	4,3	1,6	7,5	16,8	29,1	0,2	2,8	8,5
8/out	282	1,005	-0,130	1,584	38,0	29,1	22,4	22,6	35,8	22,3	36,1	28,6	2,7	6,0	76,0	26,0	77,0	25,0	4,3	1,8	6,4	16,0	29,2	0,2	2,7	7,9
9/out	283	1,005	-0,136	1,584	38,0	30,1	23,2	22,5	35,7	22,2	36,0	28,6	2,7	5,9	79,0	24,0	80,0	23,0	4,3	1,8	6,7	16,4	29,1	0,2	2,5	7,9
10/out	284	1,006	-0,143	1,585	38,1	30,3	23,3	23,9	36,4	23,6	36,7	28,7	2,9	6,2	73,0	24,0	74,0	23,0	4,5	1,8	6,8	16,5	30,2	0,2	3,3	8,8
11/out	285	1,006	-0,150	1,586	38,1	32,5	25,0	23,4	36,4	23,1	36,7	28,7	2,8	6,2	73,0	21,0	74,0	20,0	4,5	1,7	7,8	17,3	29,9	0,2	3,2	9,2
12/out	286	1,007	-0,156	1,586	38,1	25,1	19,3	24,0	36,4	23,7	36,7	28,7	2,9	6,2	71,0	22,0	72,0	21,0	4,6	1,7	5,4	13,9	30,2	0,2	3,6	8,7
13/out	287	1,007	-0,163	1,587	38,1	26,9	20,7	23,6	35,5	23,3	35,8	28,7	2,9	5,9	82,0	30,0	83,0	29,0	4,4	2,1	5,3	15,5	29,6	0,2	2,9	7,7
14/out	288	1,008	-0,169	1,587	38,2	29,4	22,6	23,9	36,7	23,6	37,0	28,7	2,9	6,3	83,0	23,0	84,0	22,0	4,6	1,9	6,3	16,4	30,3	0,2	3,9	9,2
15/out	289	1,009	-0,175	1,588	38,2	28,3	21,8	23,0	34,9	22,7	35,2	28,7	2,8	5,7	73,0	32,0	74,0	31,0	4,2	1,9	5,8	15,9	29,0	0,2	3,1	8,0
16/out	290	1,009	-0,182	1,589	38,2	33,7	25,9	22,3	36,4	22,0	36,7	28,8	2,6	6,2	75,0	22,0	76,0	21,0	4,4	1,7	8,1	17,9	29,4	0,2	2,7	8,7
17/out	291	1,010	-0,188	1,589	38,2	30,8	23,7	22,4	36,7	22,1	37,0	28,8	2,7	6,3	80,0	24,0	81,0	23,0	4,5	1,8	6,8	16,8	29,6	0,2	2,1	7,8
18/out	292	1,010	-0,194	1,590	38,2	25,2	19,4	22,7	36,4	22,4	36,7	28,8	2,7	6,2	86,0	26,0	87,0	25,0	4,4	2,0	4,9	14,4	29,6	0,2	2,7	7,4
19/out	293	1,011	-0,200	1,591	38,2	26,9	20,7	22,1	36,4	21,8	36,7	28,8	2,6	6,2	84,0	17,0	85,0	16,0	4,4	1,6	6,1	14,6	29,3	0,2	2,6	7,8
20/out	294	1,011	-0,207	1,591	38,2	21,8	16,8	22,3	36,5	22,0	36,8	28,8	2,6	6,2	83,0	21,0	84,0	20,0	4,4	1,7	4,3	12,5	29,4	0,2	2,5	7,0
21/out	295	1,012	-0,213	1,592	38,2	24,7	19,0	23,0	37,1	22,7	37,4	28,8	2,8	6,4	79,0	22,0	80,0	21,0	4,6	1,8	5,1	13,9	30,1	0,2	2,9	7,9
22/out	296	1,012	-0,219	1,592	38,2	31,0	23,9	22,7	36,4	22,4	36,7	28,8	2,7	6,2	66,0	23,0	67,0	22,0	4,4	1,6	7,4	16,5	29,6	0,2	3,0	8,8
23/out	297	1,013	-0,224	1,593	38,3	24,4	18,8	23,1	36,4	22,8	36,7	28,8	2,8	6,2	71,0	21,0	72,0	20,0	4,5	1,6	5,3	13,5	29,8	0,2	3,9	8,8
24/out	298	1,013	-0,230	1,593	38,3	30,6	23,5	22,0	36,4	21,7	36,7	28,8	2,6	6,2	69,0	23,0	70,0	22,0	4,4	1,6	7,2	16,3	29,2	0,2	3,1	8,8
25/out	299	1,014	-0,236	1,594	38,3	23,1	17,8	22,0	37,2	21,7	37,5	28,8	2,6	6,4	69,0	22,0	70,0	21,0	4,5	1,6	4,9	12,9	29,6	0,2	2,5	7,4
26/out	300	1,014	-0,242	1,595	38,3	30,7	23,6	23,3	37,7	23,0	38,0	28,8	2,8	6,6	68,0	19,0	69,0	18,0	4,7	1,6	7,5	16,2	30,5	0,2	2,9	9,0
27/out	301	1,015	-0,247	1,595	38,3	31,9	24,5	22,5	37,3	22,2	37,6	28,8	2,7	6,5	71,0	22,0	72,0	21,0	4,6	1,7	7,6	17,0	29,9	0,2	3,1	9,2
28/out	302	1,015	-0,253	1,596	38,3	29,9	23,0	23,5	37,4	23,2	37,7	28,8	2,8	6,5	79,0	23,0	80,0	22,0	4,7	1,9	6,5	16,5	30,5	0,2	3,3	9,0
29/out	303	1,016	-0,259	1,596	38,3	28,1	21,6	22,4	36,9	22,1	37,2	28,8	2,7	6,3	87,0	20,0	88,0	19,0	4,5	1,8	6,1	15,5	29,7	0,2	3,2	8,5
30/out	304	1,016	-0,264	1,597	38,3	31,6	24,3	22,2	36,8	21,9	37,1	28,8	2,6	6,3	83,0	23,0	84,0	22,0	4,5	1,8	7,1	17,3	29,5	0,2	2,8	8,5
31/out	305	1,017	-0,269	1,597	38,2	33,4	25,7	23,1	37,1	22,8	37,4	28,8	2,8	6,4	72,0	21,0	73,0	20,0	4,6	1,7	8,0	17,7	30,1	0,2	2,8	9,0
1/nov	306	1,017	-0,275	1,598	27,2	32,3	24,9	21,9	37,2	21,6	37,5	20,5	2,6	6,4	79,0	17,0	80,0	16,0	4,5	1,6	12,1	12,7	29,6	0,2	2,5	7,5
2/nov	307	1,018	-0,280	1,598	38,2	27,2	20,9	22,8	37,9	22,5	38,2	28,8	2,7	6,7	71,0	26,0	72,0	25,0	4,7	1,8	5,8	15,1	30,4	0,2	2,8	8,2
3/nov	308	1,018	-0,285	1,599	38,2	24,7	19,0	23,7	36,9	23,4	37,2	28,8	2,9	6,3	78,0	26,0	79,0	25,0	4,6	1,9	4,9	14,1	30,3	0,2	2,9	7,7
4/nov	309	1,019	-0,290	1,599	38,2	29,9	23,1	23,1	37,5	22,8	37,8	28,8	2,8	6,6	77,0	23,0	78,0	22,0	4,7	1,8	6,6	16,4	30,3	0,2	2,5	8,3
5/nov	310	1,019	-0,295	1,600	38,2	27,2	20,9	23,0	37,0	22,7	37,3	28,8	2,8	6,4	76,0	23,0	77,0	22,0	4,6	1,8	5,9	15,0	30,0	0,2	2,8	8,1
6/nov	311	1,020	-0,300	1,600	38,2	27,3	21,0	22,2	37,8	21,9	38,1	28,8	2,6	6,7	80,0	21,0	81,0	20,0	4,6	1,8	6,0	15,0	30,0	0,2	3,1	8,6
7/nov	312	1,020	-0,304	1,601	38,2	27,0	20,8	21,9	37,2	21,6	37,5	28,8	2,6	6,4	77,0	24,0	78,0	23,0	4,5	1,8	5,8	14,9	29,6	0,2	2,5	7,8
8/nov	313	1,021	-0,309	1,601	38,2	30,9	23,8	22,5	37,9	22,2	38,2	28,8	2,7	6,7	83,0	20,0	84,0	19,0	4,7	1,8	7,0	16,7	30,2	0,2	2,4	8,4
9/nov	314	1,021	-0,314	1,602	38,2	24,9	19,1	22,1	36,9	21,8	37,2	28,7	2,6	6,3	82,0	24,0	83,0	23,0	4,5	1,8	5,1	14,1	29,5	0,2	3,1	8,0
10/nov	315	1,022	-0,318	1,602	38,2	30,1	23,2	22,6	36,8	22,3	37,1	28,7	2,7	6,3	85,0	25,0	86,0	24,0	4,5	1,9	6,4	16,8	29,7	0,2	2,5	8,0
11/nov	316	1,022	-0,322	1,603	38,2	29,4	22,7	22,2	36,7	21,9	37,0	28,7	2,6	6,3	88,0	27,0	89,0	26,0	4,5	2,0	6,0	16,6	29,5	0,2	2,7	8,0
12/nov	317	1,022	-0,327	1,603	38,1	30,3	23,3	24,3	36,9	24,0	37,2	28,7	3,0	6,3	78,0	28,0	79,0	27,0	4,7	2,1	6,3	17,0	30,6	0,3	3,2	8,7
13/nov	318	1,023	-0,331	1,603	38,1	25,5	19,6	24,4	34,4	24,1	34,7	28,7	3,0	5,5	78,0	31,0	79,0	30,0	4,3	2,0	4,9	14,7	29,4	0,2	3,1	7,5
14/nov	319	1,023	-0,335	1,604	38,1	31,3	24,1	23,1	36,0	22,8	36,3	28,7	2,8	6,0	83,0	24,0	84,0	23,0	4,4	1,9	6,9	17,2	29,6	0,2	3,1	8,6
15/nov	320	1,024	-0,339	1,604	38,1	27,2	20,9	22,6	36,9	22,3	37,2	28,7	2,7	6,3	79,0	18,0	80,0	17,0	4,5	1,6	6,2	14,7	29,8	0,2	2,6	8,0
16/nov	321	1,024	-0,343	1,605	38,1	33,2	25,6	21,9	36,8	21,6	37,1	28,7	2,6	6,3	84,0	23,0	85,0	22,0	4,4	1,8	7,6	18,0	29,4	0,2	2,6	8,5

Tabela 23. Dados obtidos em campo e cálculo da Eto para o algodoeiro irrigado safra 2008/2009 em Apodi, RN - continuação

	DJ	dr	d	Ang. Solar	Ra	Rs	Rns	Tmi n	Tma x	Tm	Tx	Rso	e _o _T m	e _o _Tx	UR_x	UR_m	URxc or (+1)	URmc or (-1)	e _s	e _a (real)	R _n L	R _n	T_ar	D	vento	ETo
								°C	°C	°C	°C		Kpa	Kpa	%	%	%	%	kPa				°C		m/s	mm/dia
17/nov	322	1,024	-0,347	1,605	38,1	25,5	19,6	22,5	37,4	22,2	37,7	28,7	2,7	6,5	85,0	25,0	86,0	24,0	4,6	2,0	5,1	14,5	30,0	0,2	3,0	8,0
18/nov	323	1,025	-0,350	1,605	38,1	36,0	27,7	22,4	36,3	22,1	36,6	28,7	2,7	6,1	79,0	26,0	80,0	25,0	4,4	1,8	8,3	19,4	29,4	0,2	2,7	8,9
19/nov	324	1,025	-0,354	1,606	38,1	33,1	25,5	22,5	37,8	22,2	38,1	28,7	2,7	6,7	76,0	22,0	77,0	21,0	4,7	1,7	7,8	17,7	30,2	0,2	3,0	9,2
20/nov	325	1,025	-0,357	1,606	38,0	32,9	25,3	27,4	37,0	27,1	37,3	28,6	3,6	6,4	86,0	26,0	87,0	25,0	5,0	2,4	6,4	18,9	32,2	0,3	3,2	9,1
21/nov	326	1,026	-0,361	1,606	38,0	27,2	20,9	22,0	36,4	21,7	36,7	28,6	2,6	6,2	82,0	23,0	83,0	22,0	4,4	1,8	5,9	15,0	29,2	0,2	2,9	8,0
22/nov	327	1,026	-0,364	1,607	38,0	28,0	21,6	21,0	36,9	20,7	37,2	28,6	2,4	6,3	78,0	18,0	79,0	17,0	4,4	1,5	6,7	14,9	29,0	0,2	3,0	8,5
23/nov	328	1,027	-0,367	1,607	38,0	27,1	20,9	22,6	36,2	22,3	36,5	28,6	2,7	6,1	74,0	23,0	75,0	22,0	4,4	1,7	6,0	14,8	29,4	0,2	3,0	8,2
24/nov	329	1,027	-0,370	1,607	38,0	34,9	26,8	22,9	37,4	22,6	37,7	28,6	2,7	6,5	74,0	20,0	75,0	19,0	4,6	1,7	8,6	18,3	30,2	0,2	3,0	9,4
25/nov	330	1,027	-0,373	1,608	38,0	23,6	18,1	23,2	37,2	22,9	37,5	28,6	2,8	6,4	82,0	22,0	83,0	21,0	4,6	1,9	4,7	13,4	30,2	0,2	3,3	8,1
26/nov	331	1,028	-0,376	1,608	38,0	25,5	19,6	23,7	37,6	23,4	37,9	28,6	2,9	6,6	82,0	24,0	83,0	23,0	4,7	2,0	5,1	14,5	30,7	0,3	3,4	8,5
27/nov	332	1,028	-0,379	1,608	38,0	26,2	20,2	22,9	35,6	22,6	35,9	28,6	2,7	5,9	78,0	24,0	79,0	23,0	4,3	1,8	5,6	14,6	29,3	0,2	3,1	7,9
28/nov	333	1,028	-0,381	1,608	37,9	34,1	26,3	21,4	36,9	21,1	37,2	28,6	2,5	6,3	80,0	21,0	81,0	20,0	4,4	1,7	8,3	18,0	29,2	0,2	2,5	8,6
29/nov	334	1,028	-0,384	1,609	37,9	23,5	18,1	22,6	37,5	22,3	37,8	28,6	2,7	6,6	82,0	27,0	83,0	26,0	4,6	2,0	4,5	13,6	30,1	0,2	2,8	7,5
30/nov	335	1,029	-0,386	1,609	37,9	22,0	17,0	23,9	37,1	23,6	37,4	28,6	2,9	6,4	83,0	29,0	84,0	28,0	4,7	2,1	3,9	13,1	30,5	0,2	3,1	7,5
1/dez	336	1,029	-0,388	1,609	37,9	20,5	15,8	23,3	36,2	23,0	36,5	28,5	2,8	6,1	84,0	29,0	85,0	28,0	4,5	2,1	3,6	12,2	29,8	0,2	2,7	6,7
2/dez	337	1,029	-0,391	1,609	37,9	26,5	20,4	23,0	36,0	22,7	36,3	28,5	2,8	6,0	83,0	29,0	84,0	28,0	4,4	2,0	5,3	15,2	29,5	0,2	2,6	7,4
3/dez	338	1,029	-0,393	1,609	37,9	27,2	20,9	23,7	33,9	23,4	34,2	28,5	2,9	5,4	84,0	33,0	85,0	32,0	4,1	2,1	5,3	15,7	28,8	0,2	2,4	7,0
4/dez	339	1,030	-0,395	1,610	37,9	23,7	18,2	22,9	36,8	22,6	37,1	28,5	2,7	6,3	89,0	25,0	90,0	24,0	4,5	2,0	4,5	13,7	29,9	0,2	2,3	6,9
5/dez	340	1,030	-0,396	1,610	37,9	26,7	20,6	23,2	38,1	22,9	38,4	28,5	2,8	6,8	88,0	21,0	89,0	20,0	4,8	1,9	5,6	15,0	30,7	0,3	2,7	8,0
6/dez	341	1,030	-0,398	1,610	37,9	27,1	20,9	23,6	37,1	23,3	37,4	28,5	2,9	6,4	78,0	20,0	79,0	19,0	4,6	1,8	6,0	14,8	30,4	0,2	2,8	8,2
7/dez	342	1,030	-0,400	1,610	37,9	24,7	19,0	21,8	36,9	21,5	37,2	28,5	2,6	6,3	77,0	23,0	78,0	22,0	4,5	1,7	5,3	13,7	29,4	0,2	2,7	7,7
8/dez	343	1,031	-0,401	1,610	37,9	27,5	21,1	23,5	36,6	23,2	36,9	28,5	2,8	6,2	77,0	23,0	78,0	22,0	4,5	1,8	6,0	15,2	30,1	0,2	2,9	8,1
9/dez	344	1,031	-0,402	1,610	37,9	25,3	19,5	23,1	35,1	22,8	35,4	28,5	2,8	5,7	82,0	28,0	83,0	27,0	4,3	1,9	5,0	14,4	29,1	0,2	2,7	7,2
10/dez	345	1,031	-0,404	1,611	37,8	22,5	17,3	24,9	36,0	24,6	36,3	28,5	3,1	6,0	78,0	28,0	79,0	27,0	4,6	2,1	4,2	13,2	30,5	0,2	2,9	7,3
11/dez	346	1,031	-0,405	1,611	37,8	22,6	17,4	24,7	36,7	24,4	37,0	28,5	3,1	6,3	80,0	29,0	81,0	28,0	4,7	2,1	4,1	13,3	30,7	0,3	3,3	7,6
12/dez	347	1,031	-0,406	1,611	37,8	23,4	18,0	24,3	36,6	24,0	36,9	28,5	3,0	6,2	79,0	23,0	80,0	22,0	4,6	1,9	4,7	13,3	30,5	0,2	3,6	8,2
13/dez	348	1,032	-0,406	1,611	37,8	24,0	18,5	22,1	36,9	21,8	37,2	28,5	2,6	6,3	86,0	23,0	87,0	22,0	4,5	1,9	4,9	13,6	29,5	0,2	3,2	7,9
14/dez	349	1,032	-0,407	1,611	37,8	23,7	18,2	23,4	37,1	23,1	37,4	28,5	2,8	6,4	85,0	23,0	86,0	22,0	4,6	1,9	4,7	13,6	30,3	0,2	2,8	7,5
15/dez	350	1,032	-0,408	1,611	37,8	23,7	18,2	23,3	36,4	23,0	36,7	28,5	2,8	6,2	82,0	29,0	83,0	28,0	4,5	2,0	4,5	13,8	29,9	0,2	2,5	7,0
16/dez	351	1,032	-0,408	1,611	37,8	22,3	17,2	22,7	36,2	22,4	36,5	28,5	2,7	6,1	84,0	25,0	85,0	24,0	4,4	1,9	4,3	12,9	29,5	0,2	2,5	6,9
17/dez	352	1,032	-0,409	1,611	37,8	27,3	21,0	21,5	37,2	21,2	37,5	28,5	2,5	6,4	80,0	22,0	81,0	21,0	4,5	1,7	6,1	14,9	29,4	0,2	3,0	8,4
18/dez	353	1,032	-0,409	1,611	37,8	26,1	20,1	22,0	37,3	21,7	37,6	28,5	2,6	6,5	79,0	22,0	80,0	21,0	4,5	1,7	5,7	14,4	29,7	0,2	2,7	7,9
19/dez	354	1,032	-0,409	1,611	37,8	26,8	20,6	23,0	37,1	22,7	37,4	28,5	2,8	6,4	75,0	23,0	76,0	22,0	4,6	1,8	5,9	14,7	30,1	0,2	2,6	7,9
20/dez	355	1,033	-0,409	1,611	37,8	19,8	15,2	24,4	35,3	24,1	35,6	28,5	3,0	5,8	74,0	31,0	75,0	30,0	4,4	2,0	3,4	11,8	29,9	0,2	2,5	6,4
21/dez	356	1,033	-0,409	1,611	37,9	22,1	17,0	23,8	35,8	23,5	36,1	28,5	2,9	6,0	81,0	27,0	82,0	26,0	4,4	2,0	4,1	12,9	29,8	0,2	3,1	7,3
22/dez	357	1,033	-0,409	1,611	37,9	22,4	17,2	24,2	36,5	23,9	36,8	28,5	3,0	6,2	80,0	25,0	81,0	24,0	4,6	2,0	4,3	13,0	30,4	0,2	3,4	7,9
23/dez	358	1,033	-0,408	1,611	37,9	25,5	19,7	20,9	36,7	20,6	37,0	28,5	2,4	6,3	84,0	21,0	85,0	20,0	4,4	1,7	5,6	14,1	28,8	0,2	2,7	7,7
24/dez	359	1,033	-0,408	1,611	37,9	22,5	17,4	23,2	36,0	22,9	36,3	28,5	2,8	6,0	80,0	24,0	81,0	23,0	4,4	1,8	4,4	12,9	29,6	0,2	2,4	6,9
25/dez	360	1,033	-0,407	1,611	37,9	22,3	17,2	22,5	37,7	22,2	38,0	28,5	2,7	6,6	75,0	21,0	76,0	20,0	4,7	1,7	4,6	12,5	30,1	0,2	2,6	7,5
26/dez	361	1,033	-0,406	1,611	37,9	22,7	17,5	23,9	36,2	23,6	36,5	28,5	2,9	6,1	78,0	23,0	79,0	22,0	4,5	1,8	4,5	13,0	30,1	0,2	2,8	7,4
27/dez	362	1,033	-0,406	1,611	37,9	26,7	20,6	21,8	37,6	21,5	37,9	28,5	2,6	6,6	83,0	18,0	84,0	17,0	4,6	1,7	6,0	14,5	29,7	0,2	2,4	7,7
28/dez	363	1,033	-0,405	1,611	37,9	25,0	19,2	24,6	37,1	24,3	37,4	28,5	3,0	6,4	76,0	26,0	77,0	25,0	4,7	2,0	5,0	14,3	30,9	0,3	2,7	7,7

Tabela 23. Dados obtidos em campo e cálculo da Eto para o algodoeiro irrigado safra 2008/2009 em Apodi, RN - continuação

	DJ	dr	d	Ang. Solar	Ra	Rs	Rns	Tmin	Tmax	Tm	Tx	Rso	e _o T _m	e _o T _x	UR _x	UR _m	URxc or (+1)	URmc or (-1)	e _s	e _s (real)	R _n L	R _n	T _{ar}	D	vento	ET _o
								°C	°C	°C	°C		Kpa	Kpa	%	%	%	%	kPa				°C		m/s	mm/dia
29/dez	364	1,033	-0,404	1,611	37,9	25,9	19,9	24,7	37,6	24,4	37,9	28,6	3,1	6,6	76,0	25,0	77,0	24,0	4,8	2,0	5,3	14,7	31,2	0,3	2,4	7,6
30/dez	365	1,033	-0,402	1,610	37,9	25,7	19,8	24,8	36,9	24,5	37,2	28,6	3,1	6,3	72,0	24,0	73,0	23,0	4,7	1,9	5,4	14,4	30,9	0,3	2,7	7,9
31/dez	366	1,033	-0,401	1,610	37,9	26,3	20,2	22,8	36,6	22,5	36,9	28,6	2,7	6,2	80,0	22,0	81,0	21,0	4,5	1,8	5,7	14,6	29,7	0,2	2,9	8,0
1/jan	1	1,033	-0,401	1,610	37,9	26,9	20,7	23,4	37,5	23,1	37,8	28,6	2,8	6,6	81,0	21,0	82,0	20,0	4,7	1,8	5,8	14,9	30,5	0,2	2,8	8,1
2/jan	2	1,033	-0,400	1,610	38,0	24,2	18,6	22,1	36,5	21,8	36,8	28,6	2,6	6,2	81,0	27,0	82,0	26,0	4,4	1,9	4,8	13,8	29,3	0,2	2,9	7,5
3/jan	3	1,033	-0,398	1,610	38,0	23,2	17,9	24,2	36,0	23,9	36,3	28,6	3,0	6,0	85,0	29,0	86,0	28,0	4,5	2,1	4,2	13,7	30,1	0,2	2,6	7,0
4/jan	4	1,033	-0,396	1,610	38,0	20,9	16,1	24,1	36,7	23,8	37,0	28,6	2,9	6,3	87,0	28,0	88,0	27,0	4,6	2,2	3,6	12,5	30,4	0,2	2,9	7,0
5/jan	5	1,033	-0,395	1,610	38,0	23,9	18,4	23,4	36,7	23,1	37,0	28,6	2,8	6,3	87,0	26,0	88,0	25,0	4,6	2,0	4,5	13,9	30,1	0,2	2,6	7,2
6/jan	6	1,033	-0,393	1,609	38,0	21,7	16,7	24,0	36,8	23,7	37,1	28,6	2,9	6,3	81,0	26,0	82,0	25,0	4,6	2,0	4,0	12,7	30,4	0,2	3,1	7,5
7/jan	7	1,033	-0,391	1,609	38,0	23,0	17,7	24,6	35,8	24,3	36,1	28,6	3,0	6,0	78,0	24,0	79,0	23,0	4,5	1,9	4,5	13,2	30,2	0,2	3,1	7,7
8/jan	8	1,033	-0,388	1,609	38,0	26,8	20,6	23,0	37,0	22,7	37,3	28,6	2,8	6,4	79,0	25,0	80,0	24,0	4,6	1,9	5,6	15,0	30,0	0,2	2,3	7,4
9/jan	9	1,033	-0,386	1,609	38,1	25,1	19,3	24,1	36,4	23,8	36,7	28,7	2,9	6,2	72,0	26,0	73,0	25,0	4,6	1,9	5,2	14,2	30,3	0,2	2,8	7,7
10/jan	10	1,033	-0,384	1,609	38,1	18,9	14,5	26,5	35,1	26,2	35,4	28,7	3,4	5,7	77,0	31,0	78,0	30,0	4,6	2,2	3,0	11,5	30,8	0,3	2,7	6,4
11/jan	11	1,032	-0,381	1,608	38,1	27,8	21,4	23,7	37,4	23,4	37,7	28,7	2,9	6,5	72,0	20,0	73,0	19,0	4,7	1,7	6,3	15,1	30,6	0,3	2,9	8,5
12/jan	12	1,032	-0,379	1,608	38,1	28,4	21,8	23,9	38,1	23,6	38,4	28,7	2,9	6,8	70,0	18,0	71,0	17,0	4,8	1,6	6,7	15,1	31,0	0,3	2,9	8,7
13/jan	13	1,032	-0,376	1,608	38,1	27,3	21,0	23,9	37,3	23,6	37,6	28,7	2,9	6,5	80,0	24,0	81,0	23,0	4,7	1,9	5,7	15,4	30,6	0,3	2,6	7,9
14/jan	14	1,032	-0,373	1,608	38,2	24,5	18,8	24,2	37,1	23,9	37,4	28,7	3,0	6,4	78,0	19,0	79,0	18,0	4,7	1,8	5,2	13,7	30,7	0,3	2,6	7,7
15/jan	15	1,032	-0,370	1,607	38,2	26,3	20,2	24,5	36,8	24,2	37,1	28,7	3,0	6,3	76,0	20,0	77,0	19,0	4,7	1,8	5,7	14,5	30,7	0,3	2,8	8,1
16/jan	16	1,032	-0,367	1,607	38,2	15,2	11,7	24,6	34,8	24,3	35,1	28,8	3,0	5,7	79,0	35,0	80,0	34,0	4,3	2,2	2,0	9,7	29,7	0,2	2,2	5,3
17/jan	17	1,032	-0,364	1,607	38,2	22,1	17,0	23,4	37,1	23,1	37,4	28,8	2,8	6,4	82,0	30,0	83,0	29,0	4,6	2,1	3,9	13,1	30,3	0,2	2,4	6,8
18/jan	18	1,031	-0,361	1,606	38,2	24,3	18,7	24,6	36,3	24,3	36,6	28,8	3,0	6,1	80,0	25,0	81,0	24,0	4,6	2,0	4,7	14,0	30,5	0,2	4,5	8,9
19/jan	19	1,031	-0,357	1,606	38,3	23,8	18,4	23,7	36,5	23,4	36,8	28,8	2,9	6,2	81,0	26,0	82,0	25,0	4,5	2,0	4,6	13,8	30,1	0,2	2,4	7,0
20/jan	20	1,031	-0,354	1,606	38,3	20,9	16,1	24,6	35,8	24,3	36,1	28,8	3,0	6,0	83,0	30,0	84,0	29,0	4,5	2,2	3,5	12,6	30,2	0,2	2,7	6,7
21/jan	21	1,031	-0,350	1,605	38,3	11,9	9,2	24,6	31,8	24,3	32,1	28,8	3,0	4,8	88,0	55,0	89,0	54,0	3,9	2,7	0,9	8,2	28,2	0,2	2,2	3,8
22/jan	22	1,031	-0,347	1,605	38,3	23,5	18,1	23,0	36,0	22,7	36,3	28,8	2,8	6,0	91,0	30,0	92,0	29,0	4,4	2,2	4,1	13,9	29,5	0,2	1,8	6,2